



**UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

INGENIERÍA CIVIL EN MINAS

**“ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICO DEL USO DE
HIDRÓGENO Y CELDAS DE COMBUSTIBLE APLICADO A SISTEMAS DE
VENTILACIÓN DE MINA”**

DAVID IGNACIO HANSEN SALAS

**PROFESOR GUÍA: Dr. SERGIO RIVERA O.
Dra. CAROLINA HERRADÓN H.**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN MINAS**

**SANTIAGO – CHILE
DICIEMBRE, 2017**



FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL EN MINAS
DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y PROPIEDAD

Yo, **David Ignacio Hansen Salas**, declaro que este documento no incorpora material de otros autores sin identificar debidamente la fuente.

Santiago, 19 de Diciembre de 2017

A handwritten signature in black ink is written over a horizontal line. The signature is stylized, with a prominent vertical stroke and several loops and flourishes.

Firma del alumno

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad mostrar los resultados obtenidos a partir del estudio de pre-factibilidad técnico-económico realizado al uso de hidrógeno y de celdas de combustible aplicado a sistemas de ventilación de minas subterráneas en Chile, en el cual se evalúa el potencial uso que esta tecnología podría tener en dicha actividad considerando aspectos como el mercado en el que se espera introducir, la compatibilidad técnica que presenta, y los costos asociados que presentaría su uso, utilizando para su desarrollo un análisis bibliográfico respecto a los principales elementos y procesos involucrados, además de la simulación, a través del software Ventsim®, de 3 escenarios ficticios en miras de conocer su potencial aplicación práctica.

En el caso del análisis de mercado, se observa que a nivel global la utilización de celdas de hidrógeno cada vez aumenta más, alcanzando para el año 2016 las 60,000 unidades comercializadas alrededor del mundo y la generación de 500 MW a partir de su uso, contrastando drásticamente con el mercado local, donde su uso es casi nulo y la producción de hidrógeno asociada se reduce solo a generación de gas de uso industrial, provocando que la oferta no responda a la demanda existente en el contexto minero nacional, donde ahorros en energía, reducción de contaminación y optimización de sistemas de ventilación son cada vez más requeridos.

Respecto al análisis técnico, el uso de celdas no presentaría mayores inconvenientes en materia de localización, cumplimiento de la norma legal imperante, disponibilidad de insumos para la generación de hidrógeno a partir de procesos de hidrólisis o de ciclos termoquímicos, y generación de potencia suficiente para alimentar los sistemas de ventilación bajo los 3 escenarios simulados. Sin embargo, presenta algunas dificultades en materia de disponibilidad de celdas a nivel local (evidenciando una dependencia internacional) y en su uso en ambientes mineros, donde si bien ya han sido utilizadas y probadas, existe sensibilidad respecto a los niveles de oxígeno y temperaturas que se podrían encontrar al interior de la mina.

Finalmente, respecto al análisis económico de costos, a nivel global el uso de celdas no es competitivo en comparación a la utilización directa de energías renovables como la solar o la eólica, presentando un costo nivelado de 137 US/KWh en contraste a 50 US/KWh y 45 US/KWh respectivamente, mientras que a nivel local presenta una leve ventaja en comparación a los costos nivelados nacionales que dichas energías generan, los cuales se elevan a 211 US/KWh y 139 US/KWh respectivamente.

*A mi familia y amigos,
quienes me impulsan a seguir
día a día y a sacar lo mejor de mí.*

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer en primer lugar a mis profesores guías, Sergio Rivera O. y Carolina Herradón H., por su constante apoyo y dedicación desde el primer día que decidí perseguir la temática abordada en este trabajo, y por la motivación constante entregada en cada consulta, reunión y evaluación que compartimos.

En segundo lugar, agradecer a mi familia: a mi padre Iván por siempre impulsarme a ser mejor, a mi madre Leonor por el cariño brindado y por haberme dado la posibilidad de perseguir estudios universitarios, y a mi hermana Nicole, quien día a día me forzó a ser mejor y a confiar en mis capacidades.

En tercer lugar, agradecer a todos los futuros colegas que me apoyaron durante este proceso, en particular a David, Mario y Yanina, quienes sin obligación alguna y de manera desinteresada contribuyeron con su experiencia y tiempo a ayudarme en materias que en ese entonces eran totalmente desconocidas para mí.

Agradecer también a todos mis amigos, tanto de la universidad como de la vida, que inconscientemente, y en ocasiones de manera directa, me incentivaban a seguir y a alcanzar mi máximo potencial.

Finalmente, agradecer a la universidad por el apoyo brindado, por permitirme estudiar pese a las dificultades económicas existentes, y por otorgarme la base necesaria para desarrollarme íntegramente como profesional, y como ser humano.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	9
I.1. Importancia de realizar el proyecto	9
I.2. Contribución del trabajo	10
I.3. Objetivo general.....	10
I.3.1. Objetivos específicos	11
I.4 Limitaciones y alcances del proyecto	11
I.5. Organización y presentación de este trabajo.....	11
II. MARCO TEÓRICO	13
II.1 Energías renovables.....	13
II.1.1 Energía solar.....	13
II.2 Energía eólica	18
II.3 Celdas de combustible.....	19
II.3.1 Celdas de combustible con membrana de intercambio de protones	20
II.4 Producción de hidrógeno.....	21
II.4.1 Producción de hidrógeno a través de electrólisis	22
II.4.2 Producción de hidrógeno a través de ciclos termoquímicos.....	23
II.5 Sistemas de ventilación en minería	25
II.5.1 Cálculo de caudales de aire requeridos	26
III. ESTUDIO DE MERCADO	28
III.1 Análisis de la oferta.....	28
III.2 Análisis de la demanda.....	30
III.3 Análisis estratégico	33
III.3.1 Análisis FODA	33
IV. ESTUDIO TÉCNICO.....	37
IV.1 Localización.....	37
IV.2 Marco legal asociado	37
IV.3 Disponibilidad de insumos necesarios	38
IV.4 Capacidad de generación energética	42
IV.4.1 Definición de escenarios a estudiar.....	42
IV.4.2 Capacidad de generación de energía	43
IV.4.3 Energía requerida por los escenarios simulados	44
IV.5 Operatividad en entorno minero	45
V. ESTUDIO ECONÓMICO – FINANCIERO.....	47
V.1 Costo general de celdas de hidrógeno tipo PEMFC.....	47
V.2 Estimación de costos de producción de hidrógeno	49
V.2.1 Producción de hidrógeno bajo procesos de electrólisis.....	49
V.2.2 Producción de hidrógeno bajo procesos de ciclos termoquímicos.....	51
V.3 Análisis comparativo de costos de utilización respecto a energías renovables no convencionales	51

V.4 Análisis comparativo de costos de utilización respecto a combustible diésel y fuente energética actual.....	55
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	57
VI.1 Mercado actual y el contexto chileno	57
VI.2 Factibilidad técnica de instalación en ambientes mineros	58
VI.3 Factibilidad técnica de generación de energía suficiente.....	59
VI.4 Costos de producción generales y locales	60
VI.5 Posibilidades de incorporación de energías renovables solar y eólica	62
VII. CONCLUSIONES GENERALES	64
VIII. RECOMENDACIONES	65
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
X. ANEXOS	70

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CELDAS DE COMBUSTIBLE Y SUS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS.....	20
TABLA 2. PRINCIPALES FAMILIAS DE CICLOS TERMOQUÍMICOS.	25
TABLA 3. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO EN LATINOAMÉRICA.	30
TABLA 4. POTENCIAL EÓLICO POR REGIÓN O ZONA.	39
TABLA 5. POTENCIAL SOLAR POR REGIÓN O ZONA.	40
TABLA 6. CICLOS TERMOQUÍMICOS Y SUS PRINCIPALES REACTIVOS.....	41
TABLA 7. RESULTADOS DE SIMULACIÓN.	45
TABLA 8. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE CELDA ANALIZADA.	47
TABLA 9. DETALLE COSTOS RELACIONADOS A CELDAS Y STACKS.....	48
TABLA 10. COSTO DETALLADO INSTALACIÓN PLANTA.	49
TABLA 11. COSTO DE PRODUCCIÓN SEGÚN PROCESO DE ELECTRÓLISIS.....	50
TABLA 12. COSTO PRODUCCIÓN HIDRÓGENO A PARTIR DE CICLOS TERMOQUÍMICOS.	51
TABLA 13. CUADRO COMPARATIVO COSTO GLOBAL ASOCIADO AL USO DE ENERGÍA.	53
TABLA 14. CUADRO COMPARATIVO COSTO LOCAL ASOCIADO AL USO DE ENERGÍA.....	54
TABLA 15. CUADRO COMPARATIVO COSTO LOCAL ASOCIADO AL USO DE ENERGÍA SIC, SING, DIÉSEL Y CELDAS.	56
TABLA 16. CARACTERÍSTICAS GENERALES VENTILADOR PRINCIPAL.	76
TABLA 17. CARACTERÍSTICAS GENERALES VENTILADOR AUXILIAR.	76
TABLA 18. POTENCIA ABSORBIDA Y COSTO ENERGÉTICO ASOCIADO VENTILADOR PRINCIPAL ERNC.....	77
TABLA 19. POTENCIA ABSORBIDA Y COSTO ENERGÉTICO ASOCIADO VENTILADOR AUXILIAR ERNC.....	77
TABLA 20. POTENCIA ABSORBIDA Y COSTO ENERGÉTICO ASOCIADO VENTILADOR PRINCIPAL DIÉSEL, SIC, SING.....	78
TABLA 21. POTENCIA ABSORBIDA Y COSTO ENERGÉTICO ASOCIADO VENTILADOR AUXILIAR DIÉSEL, SIC, SING.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PANEL FOTOVOLTAICO.	14
FIGURA 2. FLUJO DE ELECTRONES EN CÉLULA DE CELDA SOLAR.	14
FIGURA 3. EVOLUCIÓN DE PRECIOS EN PANELES FOTOVOLTAICOS.	15
FIGURA 4. ESQUEMA GENERAL ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA.	15
FIGURA 5. SISTEMA DE CILINDROS PARABÓLICOS.	16
FIGURA 6. REFLECTORES FRESNEL COMPACTOS.	17
FIGURA 7. SISTEMA DE CENTRAL SOLAR EN TORRE CENTRAL.	17
FIGURA 8. SISTEMA BASADO EN MOTORES CON FORMA DE PLATO.	18
FIGURA 9. AEROGENERADOR EN PARQUE EÓLICO.	19
FIGURA 10. REACCIÓN QUÍMICA GLOBAL ENTRE HIDRÓGENO Y OXÍGENO.	19
FIGURA 11. ESQUEMA GENERAL DE CELDA DE COMBUSTIBLE PEMFC.	21
FIGURA 12. ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO DE ELECTRÓLISIS.	23
FIGURA 13. REACCIONES PARCIALES DE DESCOMPOSICIÓN DE LA MOLÉCULA DE AGUA. ..	24
FIGURA 14. CANTIDAD DE CELDAS DE HIDRÓGENO ENVIADAS POR AÑO.	28
FIGURA 15. CANTIDAD DE MEGAWATTS ENVIADOS POR AÑO.	29
FIGURA 16. CELDAS ENVIADAS SEGÚN EL TIPO DE CELDA.	29
FIGURA 17. CANTIDAD DE MEGAWATTS ENVIADOS SEGÚN EL TIPO DE CELDA.	30
FIGURA 18. CONSUMO ENERGÉTICO PERIODO 2017-2027.	31
FIGURA 19. DISTRIBUCIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA EN LA MINERÍA DEL COBRE AL AÑO 2016.	32
FIGURA 20. PORCENTAJE DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA V/S COMBUSTIBLE POR ÁREA.	32
FIGURA 21. CAUDAL REQUERIDO V/S POTENCIA ABSORBIDA PARA VENTILADORES PRINCIPALES.	44
FIGURA 22. CAUDAL REQUERIDO V/S POTENCIA ABSORBIDA PARA VENTILADORES AUXILIARES PEQUEÑOS.	45
FIGURA 23. COSTO DEL HIDRÓGENO EN FUNCIÓN DEL COSTO DE LA ELECTRICIDAD.	50
FIGURA 24. CAUDAL V/S COSTO GLOBAL PARA VENTILADORES PRINCIPALES BAJO EL USO DE ENERGÍA SOLAR, EÓLICA Y CELDAS DE COMBUSTIBLE.	52
FIGURA 25. CAUDAL V/S COSTO GLOBAL PARA VENTILADORES AUXILIARES BAJO EL USO DE ENERGÍA SOLAR, EÓLICA Y CELDAS DE COMBUSTIBLE.	52
FIGURA 26. CAUDAL V/S COSTO LOCAL PARA VENTILADORES PRINCIPALES BAJO EL USO DE ENERGÍA SOLAR, EÓLICA Y CELDAS DE COMBUSTIBLE.	53
FIGURA 27. CAUDAL V/S COSTO LOCAL PARA VENTILADORES AUXILIARES BAJO EL USO DE ENERGÍA SOLAR, EÓLICA Y CELDAS DE COMBUSTIBLE.	54
FIGURA 28. CAUDAL V/S COSTO PARA VENTILADORES PRINCIPALES BAJO EL USO DE ENERGÍA DIÉSEL, DEL SIC, SING, Y CELDAS DE COMBUSTIBLE.	55
FIGURA 29. CAUDAL V/S COSTO PARA VENTILADORES AUXILIARES BAJO EL USO DE ENERGÍA DIÉSEL, DEL SIC, SING, Y CELDAS DE COMBUSTIBLE.	56
FIGURA 30. VISTA GENERAL ESCENARIO N°1.	72
FIGURA 31. VISTA EN PLANTA ESCENARIO N°1.	73
FIGURA 32. VISTA GENERAL ESCENARIO N°2.	73
FIGURA 33. VISTA EN PLANTA ESCENARIO N°2.	74

FIGURA 34. VISTA GENERAL ESCENARIO N°3.	75
FIGURA 35. VISTA EN PLANTA ESCENARIO N°3.	75

I. INTRODUCCIÓN

I.1. Importancia de realizar el proyecto

El actual desarrollo minero que se presenta tanto a nivel nacional como internacional, muchas veces se ve condicionado por limitaciones técnicas y/o económicas que dificultan un avance sostenido y rentable de los diversos proyectos de explotación mineral, por lo que es cada vez más necesario incurrir en estrategias de diseño, planificación y gestión que presenten un potencial real de solventar las barreras que factores como el precio de mineral, la ubicación, y las leyes minerales de diferentes yacimientos generan continuamente.

En este contexto, factores como el aumento del costo de la energía eléctrica o la necesidad de inyectar nuevas reservas energéticas a los distintos sistemas de transmisión eléctricos en Chile para solventar la incorporación de nuevos proyectos y garantizar la continuidad de los actuales, producen que nuevas alternativas energéticas y/o nuevas tecnologías y procedimientos más eficientes sean cada vez más valorados y necesarios.

Si bien las etapas donde se concentra la mayor cantidad de requerimientos energéticos, y por ende el mayor costo del proyecto, suelen ocurrir en las concentradoras (Cochilco, 2016), la naturaleza de los procesos que ocurren en ellas muchas veces limita las acciones que se pueden desarrollar para lograr un uso eficiente y limpio de la energía, por lo que es necesario contemplar otras actividades que presenten un consumo energético el cual puede ser optimizado en miras de lograr la eficiencia buscada. Bajo esta perspectiva, y considerando el inminente agotamiento de recursos minerales a poca profundidad, y por consiguiente el gran desarrollo que ha presentado-y presentará-la minería subterránea; la ventilación de minas se presenta como un proceso ideal para la optimización energética, pues se enmarca dentro de las actividades obligatorias y necesarias para la correcta operación bajo superficie, y los requerimientos que cada proyecto presenta varían según las propias características estructurales y de operación que poseen, lo que hace que el impacto que se pueda generar producto de la optimización y uso eficiente de la energía sea transversal, significativo, y tenga un margen de desarrollo y aplicación mayor que otros procesos cuya naturaleza los limitan.

En la actualidad, existen compañías y proyectos mineros cuyos yacimientos, ritmos de explotación y leyes minerales, permiten sustentar los requerimientos energéticos, y por consiguiente los costos asociados, mediante la incorporación de nuevas tecnologías, fuentes de energía y sistemas eléctricos propios. Sin embargo, condiciones de operación como la altura geográfica, profundidad de las labores mineras, y limitaciones técnicas y económicas, producen que muchas de las posibles soluciones a los problemas energéticos dejen de ser viables, ya sea por condiciones físicas que impiden su implementación, o por condiciones económicas que hacen de estos proyectos no rentables, por lo que es necesario considerar dichas limitaciones al momento de diseñar y planificar el desarrollo de cualquier yacimiento.

Es por todo lo anterior que, a través de la presente investigación, se busca realizar un estudio de pre-factibilidad técnico-económico que permita visualizar el potencial uso de nuevas alternativas energéticas como lo son celdas de combustible basadas en hidrógeno, con el fin de obtener un primer acercamiento a lo que sería su uso en sistemas de ventilación aplicados a minería.

I.2. Contribución del trabajo

Se espera que con el desarrollo del presente trabajo investigativo se pueda avanzar en materias de uso de energía medioambientalmente amigable en el rubro de la minería a través del análisis de nuevas tecnologías no convencionales que permitan generar una alternativa al uso de otras energías renovables, como la solar o eólica, que si bien contribuyen a subsanar la necesidad inminente de nuevas y limpias maneras de generar energía, no siempre son una opción viable por su tamaño, requerimientos de instalación, y costos asociados.

Paralelo a lo anterior se espera a su vez que el uso de celdas de combustible, que ya ha sido desarrollado a nivel de transporte, no solo se limite a esa área, sino que pueda ser analogado a operaciones, como es el caso de la ventilación de minas, que al día de hoy son vitales y que suelen quedar en segundo plano en materias de ahorro energético.

A través del estudio comparativo de las energías renovables actuales y el uso de celdas de combustible, se busca no solo ver la viabilidad del uso de estas últimas en ambientes mineros particulares, sino que también analizar las oportunidades asociadas a su funcionamiento, como lo es el crear sinergia entre estas celdas y las fuentes de energía renovables no convencionales en vías generar una producción de hidrógeno limpia, además de analizar el potencial uso que el agua generada a partir de dichas celdas podría tener dentro de los mismos ciclos de producción de hidrógeno, o en otras actividades propias de la actividad minera.

Finalmente, y abarcando lo ya mencionado, se espera generar un primer acercamiento a alternativas energéticas que entreguen flexibilidad y portabilidad a los actuales sistemas de alimentación utilizados, con el fin de facilitar la incorporación de energía limpia a lugares cuyos accesos y condiciones generales dificultan su uso.

I.3. Objetivo general

El objetivo general de esta investigación es establecer la existencia de pre-factibilidad tanto técnica como económica en el potencial uso de celdas de combustible a base de hidrógeno como fuente de alimentación para sistemas de ventilación de minas subterráneas cuya operación se desarrolle bajo condiciones de altura y profundidad específicas, y bajo diferentes métodos de explotación.

I.3.1. Objetivos específicos

Con el presente trabajo se espera:

- I. Caracterizar la composición, el funcionamiento y potencial de las celdas de combustible, la producción de hidrógeno asociada, y los sistemas de ventilación de minas subterráneas y su configuración.
- II. Establecer, a través de un estudio de mercado, la necesidad real existente de nuevas tecnologías energéticas eco-amigables, la oferta y demanda existentes actualmente en Chile, y el análisis estratégico de la tecnología de celdas de hidrógeno y del entorno en el que se espera sean utilizadas con el fin de determinar la viabilidad de uso.
- III. Definir, a través de un estudio técnico, la pre-factibilidad de instalación, funcionamiento y uso de este tipo de energía en ambientes mineros a través del análisis de diferentes escenarios de simulación de sistemas de ventilación.
- IV. Evaluar, a través de un estudio económico-financiero, la viabilidad económica que representaría el desarrollo y uso de celdas de combustible, los costos asociados tanto de instalación como de insumos, la conveniencia respecto a los costos presentados por otras fuentes de energías alternativas, y la potencial ventaja que representaría bajo el contexto de Chile la inclusión de este tipo de tecnologías.

I.4 Limitaciones y alcances del proyecto

El trabajo presentado a continuación se enmarca bajo el contexto de los siguientes alcances y limitaciones:

- Análisis de pre-factibilidad técnico-económica basado en el uso de celdas de combustible del tipo PEM (Proton Exchange membrane).
- Producción de hidrógeno basada en hidrólisis a través del uso de energías solar y/o eólica, y en reacciones de ciclos termoquímicos de descomposición de la molécula de agua.
- Estudio de mercado basado en caracterización global y local.
- Escenarios de simulación para ventilación diseñados en software Ventsim ® y basados en 3 diferentes métodos de explotación, uno artesanal, uno mediante método sublevel stoping, y otro que simula la explotación de un bloque a través del método block caving.
- Estudio económico-financiero basado exclusivamente en el análisis de costos asociados a la implementación de celdas de combustible, dejando fuera análisis de beneficios y flujos de cajas asociados.
- Resultados generales obtenidos basados en inferencias y análisis de índole teóricos, excluyendo pruebas experimentales de autoría propia.
- Evaluación de potencial aplicación para la industria minera chilena.

I.5. Organización y presentación de este trabajo

El capítulo II de este trabajo, detalla el marco teórico bajo el cual se desarrolla el estudio de pre-factibilidad realizado, incluyendo una descripción breve del uso y funcionamiento

de las celdas de combustible a base de hidrógeno, los detalles y las alternativas existentes para la producción de hidrógeno, y los parámetros de diseño básicos para la confección de un sistema de ventilación y para la determinación del caudal de aire requerido por los proyectos mineros.

El capítulo III muestra los resultados obtenidos a partir del análisis de mercado realizado, describiendo en primer lugar la oferta actual que existe tanto de celdas de combustible como de hidrógeno, su principal combustible, desde una perspectiva local hasta una perspectiva global; en segundo lugar, la demanda existente por un aumento de la capacidad en el sistema de energía actual y por nuevas fuentes de energía renovables no convencionales limpias, con énfasis en el mercado de la minería del cobre; y en tercer lugar, la caracterización de las ventajas que presenta el desarrollo de este tipo de tecnologías y las condiciones del entorno sobre el cual se espera pueda utilizarse.

El capítulo IV exhibe los resultados obtenidos a partir del estudio técnico de pre-factibilidad realizado a las celdas de combustible, analizando en primer lugar la viabilidad de uso en cuanto a localización y tamaño del proyecto y las ventajas que presenta ante otras fuentes de energía de similares características; en segundo lugar la viabilidad ambiental y legal que involucra el uso de esta tecnología y su desarrollo; en tercer lugar la disponibilidad de recursos y materias primas para garantizar el correcto funcionamiento de las celdas, tanto para su instalación como para la producción de hidrógeno que lleva asociada; y finalmente la viabilidad técnica práctica que poseen las celdas de cubrir las necesidades energéticas que un sistema de ventilación real demandaría, realizado a través del análisis de 3 escenarios ficticios que simulan las condiciones de ventilación de minas artesanales, de mediano tamaño, y en proyectos de gran producción.

En el capítulo V se muestran los resultados obtenidos a partir del estudio económico-financiero, en los que se incluye, en primer lugar, el análisis del costo asociado a la adquisición del equipamiento y los insumos necesarios para permitir el funcionamiento de celdas de combustible, incluyendo los costos de la misma como los costos de todos los elementos requeridos para producir el hidrógeno a utilizar como combustible; y en segundo lugar, el análisis comparativo de los costos asociados a la producción de la energía requerida para satisfacer la demanda de los sistemas de ventilación simulados, considerando para este tanto el uso de hidrógeno, como el uso de energía solar o eólica.

El capítulo VI presenta, en primer lugar, las discusiones generadas a partir de los resultados obtenidos en los estudios realizados en los capítulos previos, analizando las posibilidades reales que se presentan para el uso de este tipo de tecnología; y en segundo lugar, las conclusiones generales obtenidas a partir de la presente investigación, entregando finalmente el resultado final respecto a la existencia de pre-factibilidad en la implementación de esta nueva tecnología.

II. MARCO TEÓRICO

II.1 Energías renovables

De acuerdo a lo establecido por el ministerio de energía de Chile, se entiende por energía renovable aquella energía en la que, en sus procesos de transformación y aprovechamiento en energía útil, no se consumen ni se agotan los recursos utilizados a escala humana.

Dependiendo del grado de desarrollo que cada tipo de energía presenta, así como el impacto y participación en los mercados energéticos, estas energías pueden clasificarse en convencionales y no convencionales, destacando la energía hidráulica en el caso de las convencionales, y las energías eólica, solar e hidroeléctrica en el caso de las no convencionales.

Para efectos del presente trabajo, se analizará el potencial que las energías renovables no convencionales solar y eólica presentan como fuente energética para sistemas de ventilación en minería, no solo como fuente energética para la producción de hidrógeno, sino también como punto de comparación respecto al potencial esperado que las celdas de combustibles podrían mostrar si estas se usaran directamente como fuente de alimentación energética.

II.1.1 Energía solar

Se entiende por energía solar a aquella energía proveniente del sol que puede ser convertida en energía térmica o eléctrica. Este tipo de energía se caracteriza por su abundancia y baja contaminación ambiental, lo cual sumado al gran desarrollo tecnológico que ha presentado en el último tiempo hace de este tipo de energía una de las opciones más escogidas al momento de buscar eficiencia energética (Seia.org, s.f.).

Dependiendo de la conversión energética que se desee realizar a la energía brindada por el sol, la energía solar puede ser clasificada en 3 tipos principalmente: energía solar fotovoltaica, energía solar concentrada, y energía termo-solar y frío-solar. Para efectos de la presente investigación, el potencial de participación en la generación de hidrógeno, los costos asociados a su uso en sistemas de ventilación, y las posibles sinergias que podrían desarrollarse entre este tipo de energía y las celdas de combustible serán analizados considerando solamente el uso de energía solar fotovoltaica y/o el uso de energía solar concentrada.

II.1.1.1 Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica corresponde al tipo de energía solar en la cual la radiación emitida por el sol es transformada en electricidad mediante el uso de paneles fotovoltaicos compuestos de material denominado semiconductor (ver figura 1).



Figura 1. Panel fotovoltaico.
(Energía solar al día, 2017)

Los fotones emitidos por la luz solar son percibidos y alcanzados por este material semiconductor, ionizándolo y provocando que los electrones presentes en él se liberen de los enlaces atómicos bajo los cuales están configurados. Gracias a la estructura presente en el material semiconductor, los electrones son direccionados a través de circuitos internos generando un flujo de corriente eléctrica, como se muestra en la figura 2.

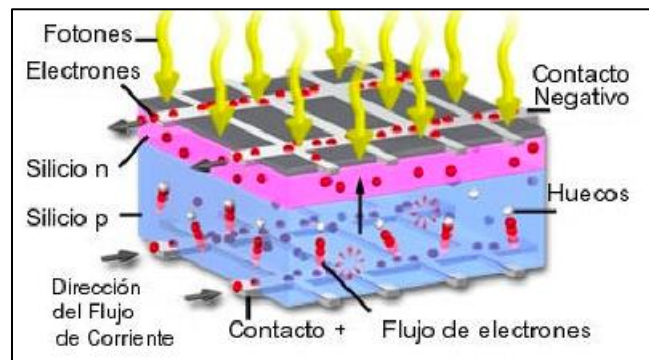


Figura 2. Flujo de electrones en célula de celda solar.
(Ecoefecto, s.f.)

Si bien este tipo de paneles suele estar expuesto constantemente a la luz solar, no poseen un 100% de eficiencia, principalmente debido a que parte de la luz solar percibida es reflejada, o, producto de la frecuencia a la cual es transmitida, es muy débil por si sola para producir la excitación de electrones (como el caso de la luz infrarroja), o genera energía calórica en vez de energía eléctrica.

Producto de los avances tecnológicos alcanzados y el aumento de demanda alcanzado, la energía solar fotovoltaica se ha convertido en una energía cada vez más asequible, reduciendo el precio promedio de los sistemas de paneles fotovoltaicos casi en un 33% desde el año 2011 (Seia.org, s.f.), como se puede apreciar en la figura 3.

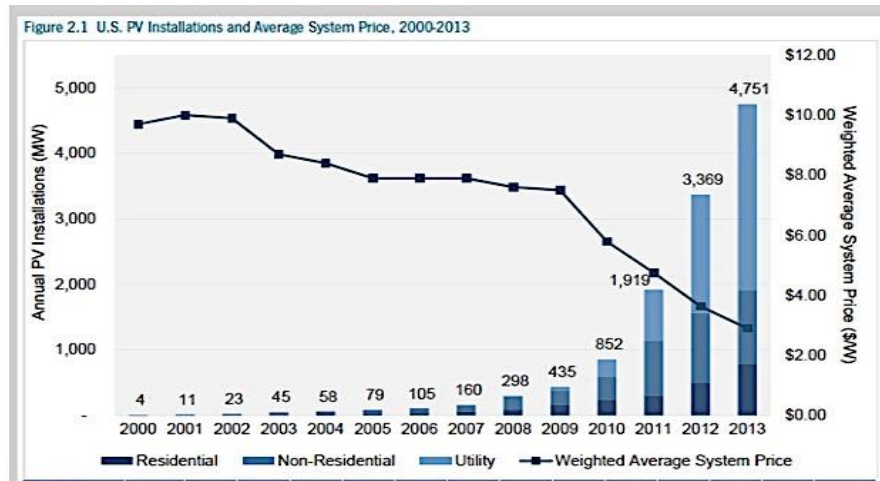


Figura 3. Evolución de precios en paneles fotovoltaicos.
(Seia.org, s.f.)

II.1.1.2 Energía solar concentrada

La energía solar concentrada corresponde a la energía obtenida a través de la acumulación del calor entregado por el sol en sistemas de espejos curvos que retienen dicho calor para su posterior transmisión, conversión y generación de energía eléctrica.

Este tipo de energía basa su funcionamiento en el uso de sistemas de paneles y estructuras parabólicas compuestas por material refractario, y en la generación de vapor, como se ve en la figura 4.

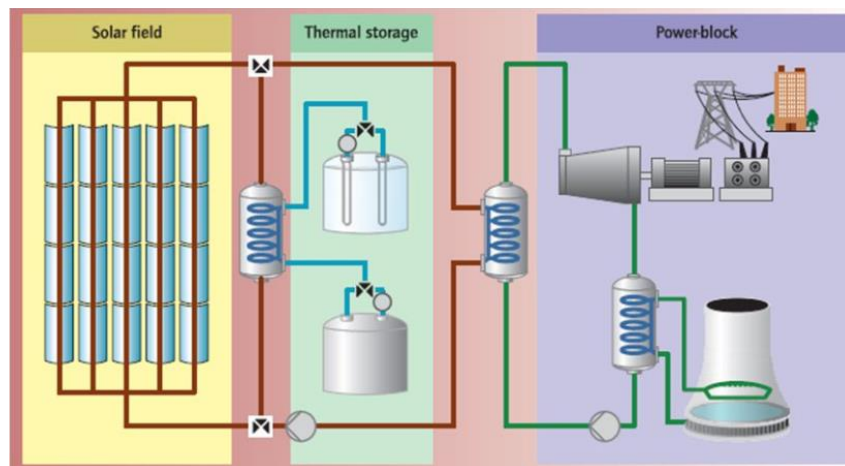


Figura 4. Esquema general energía solar concentrada.
(International Energy Agency, 2010)

Estos sistemas concentran el calor recibido por el sol en un tubo receptor que posee en su interior fluidos que permiten la transferencia de calor (etapa “solar field”) y que alcanzan temperaturas de hasta 350°C, el cual conduce el calor recolectado hacia intercambiadores que permiten traspasar dicho flujo de energía a agua (etapa “thermal storage”), la cual genera vapor que finalmente permite generar el movimiento de turbinas que generan electricidad (etapa “power block”). (Energías renovables, s.f.)

Dependiendo del tipo de estructura destinada a la concentración de calor a utilizar, los sistemas utilizados para generar energía solar concentrada se clasifican en 4 principalmente: concentración solar mediante cilindros parabólicos, sistemas de reflectores Fresnel compactos, sistemas centrales solares de torre central, y sistemas basados en motores en forma de plato (Energías renovables, s.f.).

Los sistemas basados en cilindros parabólicos usan espejos curvos para captar el calor generado por el sol, los cuales son ubicados en módulos de entre 15 y 20 pies de alto y 300 a 450 pies de largo (ver figura 5). Se estima que por cada módulo se utilizan cientos de filas de espejos ubicadas en paralelo.



Figura 5. Sistema de cilindros parabólicos.
(Planetsave, 2016)

Los sistemas basados en reflectores Fresnel Compactos funcionan bajo el mismo principio general que los sistemas de cilindros parabólicos, pero utiliza espejos planos de bajo costo ubicados en hileras paralelas de gran longitud los cuales direccionan el calor recibido a tubos en los que fluye agua, la cual se calienta generando vapor de alta presión (ver figura 6).



Figura 6. Reflectores Fresnel compactos.
(Planetsave, 2016)

Los sistemas de centrales solares de torre central, se utiliza un receptor central conectado a los sistemas de energía, el cual recibe la energía direccionada por espejos planos controlados computacionalmente ubicados a su alrededor denominados heliostatos (ver figura 7). La energía recibida es usada para calentar fluidos que permiten la transferencia de calor para producir vapor.



Figura 7. Sistema de central solar en torre central.
(Planetsave, 2016)

En cuanto a los sistemas basados en motores en forma de plato, los espejos reflectantes son distribuidos en un plato parabólico con la finalidad de concentrar la luz solar y enviarla a un receptor ubicado en su punto focal (ver figura 8). A diferencia de los sistemas previamente revisados, este tipo de estructura calienta un fluido a temperaturas cercanas

a los 600°C con el fin de permitir el funcionamiento del motor al que está conectado (similar a los motores tipo Stirling).



Figura 8. Sistema basado en motores con forma de plato.
(Planetsave, 2016)

II.2 Energía eólica

Se entiende por energía eólica a aquella que utiliza la fuerza entregada por el viento para producir electricidad, basando su funcionamiento en aerogeneradores o “molinos de viento” que, a través de sus aspas, convierten la energía cinética del viento en energía mecánica, traspasando dicho movimiento a un rotor, el cual mueve un generador eléctrico (Mainstream Renewable Power Chile, 2017).

La potencia energética que un aerogenerador puede producir dependerá de la velocidad del viento que pasa a través de las aspas, aumentando 8 veces si la velocidad inicial se duplica, por lo que su potencia final dependerá finalmente de la ubicación que el aerogenerador tenga (Generadoras de Chile, 2017).

Dependiendo de la distribución de las aspas y de la ubicación del eje de rotación respecto a la superficie, los aerogeneradores se pueden clasificar en 2 tipos principalmente, aerogeneradores de eje vertical, y aerogeneradores de eje horizontal, siendo estos últimos los más comunes, y en los que se basará principalmente el presente trabajo.



Figura 9. Aerogenerador en parque eólico.
(Programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética en Chile, s.f.)

II.3 Celdas de combustible

Las celdas de combustible son dispositivos que permiten transformar la energía química del hidrógeno en energía eléctrica y térmica. Su composición general se basa en el uso de 2 electrodos (ánodo y cátodo), los cuales se conectan a través de un electrolito. En su interior, el hidrógeno, inyectado en forma de gas de manera externa, se junta con el oxígeno presente en el ambiente y se trasladan desde el ánodo hasta el cátodo, dando lugar a la reacción presentada en la figura 10.

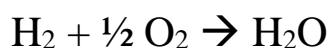


Figura 10. Reacción química global entre hidrógeno y oxígeno.
(Fuente: elaboración propia)

El potencial electroquímico teórico que presentan estas celdas es de 0.78 V (Suárez, 2016), sin embargo, este se puede incrementar juntado varias celdas de manera contigua para formar lo que se conoce como “Stack” o batería. Para garantizar el correcto funcionamiento de este tipo de celdas, se requiere suministrar hidrógeno gaseoso y garantizar temperaturas adecuada para dar lugar a la reacción, exposición al aire, y control del agua que se genera tras la ocurrencia de la reacción previamente descrita.

Dependiendo del electrolito utilizado para facilitar la reacción del hidrógeno, las celdas se pueden clasificar en 6 tipos: celdas alcalinas (AFC), de metanol directo (DMFC), de carbonato derretido (MCFC), de ácido fosfórico (PAFC), con membrana de intercambio de protones (PEMFC), y las de óxido sólido (SOFC) (Gupta, 2009). Sus principales características son presentadas en la tabla 1.

Tabla 1. Celdas de combustible y sus principales características.

Tipo de Celda	Electrolito	Catalizador anódico	Catalizador catódico	Temperatura de operación (°C)	Eficiencia (%)
AFC	Hidróxido de sodio o potasio	Pt – Au, Pt, Ag	Pt – Au, Pt, Ag	65 – 220	45 – 60
DMFC	Polímero sólido	Pt	Pt	20 – 90	40
MCFC	Carbonato de litio o potasio	Ni – Cr, Ni	Li NiO	650	45 – 60
PAFC	Ácido fosfórico	Pt	Pt – Cr – Co Pt – Ni	205	35 – 40
PEMFC	Polímero sólido	Pt – Ru, Pt	Pt	85 – 100	40 – 60
SOFC	Zirconio e itrio	NiZrO ₂ Ni	SrMnO ₃	500 – 1100	50 – 65

Tabla construida a partir de los datos entregados en el trabajo “Estado actual del hidrógeno aplicado a celdas de combustible” (Suárez, 2016) y “Hydrogen fuel: Production, transport, and storage (Gupta, 2009)

De acuerdo al tipo de instalación requerida y al uso que se le quiera dar a las celdas y stacks, estas pueden ser clasificadas en 3 grandes mercados: estacionaria, de transporte, y portables (Fuel Cell and Hydrogen Energy Association, 2017).

Las fuentes de energía estacionarias utilizan la tecnología de las celdas de combustible en instalaciones fijas, las cuales suelen ser destinadas para uso industrial y en grandes edificaciones como fuente energética primaria, fuente energética de respaldo, o fuentes combinadas de calor y energía. En el caso de celdas como fuente energética para transporte, estas son utilizadas para la industria automotriz y de maquinaria movilizadas, incluyendo su uso en automóviles, camiones y maquinaria para manejo de materiales, entre otras. Por último, el uso de celda como fuente de energía portable se restringe a celdas utilizadas como fuente energética móvil o asociadas a dispositivos electrónicos.

Para efectos del presente trabajo, y producto de las bajas temperaturas requeridas y las altas tasas de eficiencia que presenta, se evaluará la pre-factibilidad de las celdas con membrana de intercambio de protones (PEMFC).

II.3.1 Celdas de combustible con membrana de intercambio de protones

Este tipo de celdas se caracteriza por contar con temperaturas de operación relativamente bajas (85°C), por poseer una densidad de potencia alta, y por una eficiencia eléctrica alta (40 – 60%). Su membrana suele estar compuesta por una capa de polímeros de fluorocarbonos, y uso se da principalmente en lugares y equipos que requieren una demanda inicial de energía importante, siendo su aplicación más importante el uso en la industria automotriz. La figura 11 esquematiza el funcionamiento general de estas celdas.

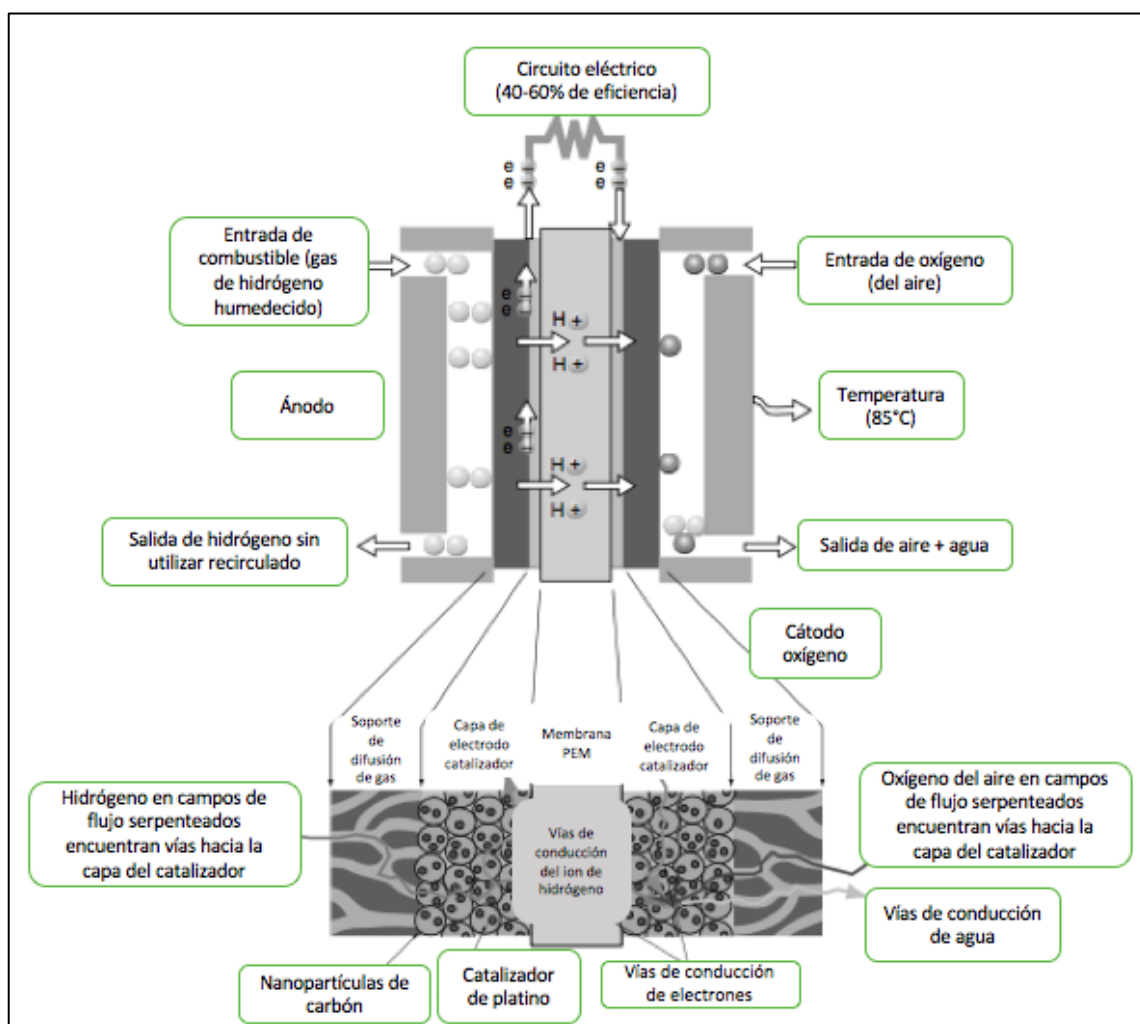


Figura 11. Esquema general de celda de combustible PEMFC.

Modificado a partir del esquema recuperado de “Hydrogen fuel: production, transport and storage” (Gupta, 2009)

II.4 Producción de hidrógeno

El hidrógeno, combustible principal para el funcionamiento de este tipo de celdas, es uno de los elementos más abundantes que se pueden encontrar en la tierra, estando presente en compuestos orgánicos y en elementos tan vitales como el agua. Producto de lo anterior, la obtención de éste resulta bastante simple, pues existen diversas fuentes que permiten extraerlo.

Los procesos bajo los cuales se puede producir hidrógeno se clasifican en 3 grupos principalmente, los procesos de conversión química, la electrólisis, y los procesos de termólisis (Suárez, 2016).

En el caso de la conversión química, el hidrógeno puede obtenerse a partir de procesos de reformado aplicados a hidrocarburos, en los que estos son expuestos a altas temperaturas con vapor de agua, o parcialmente oxidados; a través de procesos de pirólisis, en los que se exponen combustibles sólidos, como carbón o biomasa, mediante la aplicación de altas temperaturas; y a través de procesos de gasificación, en los que se forman reacciones de combustión con deficiencia de oxígeno. Si bien este tipo de obtención suele ser la más habitual, se caracteriza por tener asociada la formación de gases contaminantes como el CO₂, requiriendo, por tanto, la confinación de este último.

En el caso del proceso de electrólisis, el hidrógeno se obtiene a partir de la separación de la molécula de agua a causa del paso de corriente eléctrica en ella. Este proceso es el más efectivo para la producción de hidrógeno puro, pero suele formarse en pequeñas cantidades.

En el caso de procesos de termólisis, el hidrógeno se produce a partir de la extracción del mismo en moléculas que lo contengan, como hidrocarburos o agua, mediante la aplicación de calor, diferenciándose de la pirólisis respecto a la fuente de obtención de calor, siendo en el caso del primero extraído a partir de la misma materia prima durante la combustión, y en el segundo a través de fuentes de calor externas. En base a lo anterior, la obtención del hidrógeno se puede realizar aplicando el calor directamente a agua (donde se requieren temperaturas cercanas a los 2500 K), aplicando calor externo para los procesos previamente descritos en la conversión química (donde se requieren temperaturas entre 1000 y 2500 K), o aplicando calor a elementos que facilitan la ocurrencia de ciclos termoquímicos dependientes de elementos como el azufre, el hierro o el manganeso (donde se requieren temperaturas bajo los 1000 K) (Suárez, 2016).

Para efectos del presente trabajo, se considerará para el estudio la formación de hidrógeno a partir de electrólisis y de ciclos termoquímicos.

II.4.1 Producción de hidrógeno a través de electrólisis

Como se mencionó anteriormente, la formación de hidrógeno mediante electrólisis implica el paso de energía eléctrica a través de agua, generando la separación de sus moléculas en moléculas de H₂ y de O₂. Para que esto tenga lugar, la fuente eléctrica es conectada a dos electrodos (un ánodo y un cátodo) formados por metales inertes que se colocan en contacto con el agua, causando que, una vez iniciado el paso de corriente, se acumule hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo. El esquema general del proceso se presenta en la figura 12.

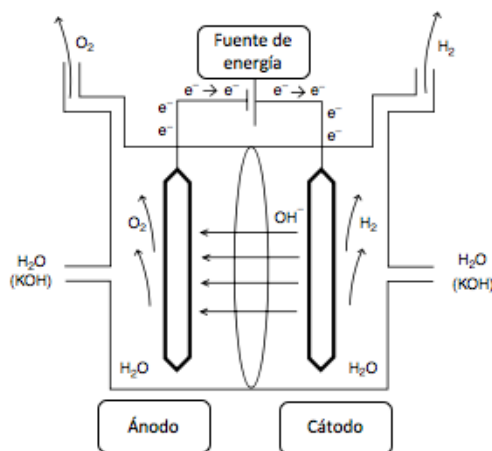


Figura 12. Esquema general del proceso de electrólisis.

Modificado a partir del esquema recuperado de “Hydrogen fuel: production, transport and storage” (Gupta, 2009)

Si bien el proceso en teoría resulta simple, la cantidad de energía requerida para que agua en estado puro se descomponga es extremadamente alta, por lo que es necesario incluir electrolitos, tales como sales, para aumentar la velocidad de reacción.

La eficiencia energética del proceso de electrólisis es cercana al 70%, pero ésta dependerá del tipo de fuente utilizada para entregar la energía eléctrica, reduciéndose en el caso de la utilización de fuentes de energía renovables (Suárez, 2016).

II.4.2 Producción de hidrógeno a través de ciclos termoquímicos

Los ciclos termoquímicos corresponden a procesos basados en reacciones químicas conducidas térmicamente que permiten la obtención de moléculas de hidrógeno y oxígeno a partir de la descomposición de la molécula de agua producida por la interacción de esta con otros compuestos, y obteniendo como resultado final la regeneración de los componentes químicos, diferentes del agua, que participan (C. H. Aporta, 2011).

Si bien los componentes químicos que permiten generar los ciclos previamente descritos son variados (existiendo alrededor de 300 diferentes ciclos propuestos), el proceso general mediante el cual se disocia la molécula de agua se puede expresar en función de los reactivos que participan y las reacciones parciales que se producen como se muestra en la figura 13, siendo Q la carga de calor aplicada. Si bien las ecuaciones presentadas reflejan la generalidad del proceso, cabe destacar que existen ciertos ciclos termoquímicos, como los que consideran el uso de un óxido metálico como punto de inicio, en los que solo ocurren 2 reacciones, reducción térmica, y re-oxidación.

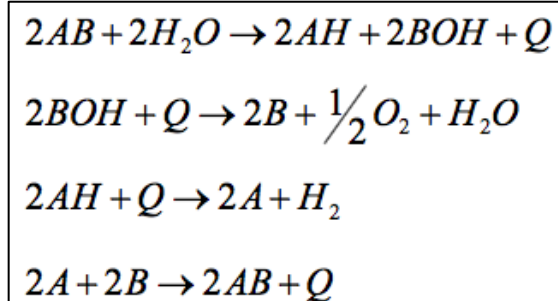


Figura 13. Reacciones parciales de descomposición de la molécula de agua.
(C. H. Aporta, 2011)

Considerando la cantidad de ciclos termoquímicos disponibles, se establecen ciertos criterios bajo los cuales se puede determinar el mejor ciclo a utilizar en base a los objetivos perseguidos y los recursos con los que se cuenta para su generación. (G.E. Besenbruch, 2000) establece que un ciclo será clasificado como eficiente en la medida que presente un bajo número de reacciones parciales, procesos de separación y elementos participantes, así como también la abundancia de sus componentes en la corteza terrestre, océanos o atmósfera, y una minimización en uso de materiales costosos. Características como los costos asociados y corrosividad de las especies también forman parte de los criterios de selección.

Dependiendo de los componentes que participen en la reacción, los ciclos químicos pueden clasificarse en diferentes familias, como la familia de los óxidos, del azufre, y de los haluros, entre otros (Martín, 2012). En la tabla 2 se presentan las principales familias y sus características.

Tabla 2. Principales familias de ciclos termoquímicos.

Ciclos de la familia del azufre			
	Pasos	Temperatura máxima (°C)	Eficiencia (%)
Sulfúrico híbrido	2	900 (1150 sin catalizador)	43
Sulfur-Iodine	3	900 (1150 sin catalizador)	38
Sulfuro multivalente		1570	35
Ciclos de óxidos metálicos volátiles			
	Pasos	Temperatura máxima (°C)	Eficiencia (%)
Zinc/óxido de zinc	2	2000	45
Cadmio híbrido		1600	42
Carbonato de cadmio		1600	43
Ciclos de óxidos metálicos no volátiles			
	Pasos	Temperatura máxima (°C)	Eficiencia (%)
Óxido de hierro	2	2200	42
Óxido de cerio	2	2000	68
Sodio/manganeso		1560	49
Ferritas	2	1100-1800	43
Ciclos de bajas temperaturas			
	Pasos	Temperatura máxima (°C)	Eficiencia (%)
Híbrido Cobre Clorhídrico	4	530	39

Recuperado de “Estudio de alternativas para la producción de hidrógeno con ciclos termoquímicos y energía solar térmica de alta temperatura”, (Martín, 2012).

II.5 Sistemas de ventilación en minería

Se entiende por sistema de ventilación de minas al conjunto de procesos y actividades mediante el cual se controlan los flujos de aire existentes dentro de las labores subterráneas de una explotación minera, con el fin de garantizar que exista una extracción de los gases contaminantes naturales o producidos por actividades realizadas al interior de la mina, y una circulación de aire limpio suficiente para garantizar la seguridad de los trabajadores que desempeñan sus labores en el proyecto.

Dependiendo del diseño y la utilización de equipos, la ventilación de minas puede ser clasificada en natural o auxiliar.

La ventilación natural implica la generación de flujos de aire mediante la circulación natural del mismo a través de una bocamina de entrada hacia una bocamina de salida ubicadas a distinta altura, con el fin de garantizar una diferencia de presión que, potenciada por la existencia de un intercambio termodinámico, permita la circulación del aire.

La ventilación auxiliar, por otra parte, corresponde a aquella que es apoyada por ductos o ventiladores auxiliares, los cuales permiten garantizar una ventilación general estable y alcanzar aquellos puntos de la mina que son más conflictivos, como niveles muy profundos o labores cerradas. Para conseguir una ventilación efectiva, se generan circuitos tanto de alimentación como de evacuación, con el fin de inyectar aire fresco donde se requiera y extraer el aire viciado una vez contaminado.

Por razones de seguridad, y para garantizar un sistema de ventilación estable, no deben utilizarse sistemas naturales como medio único de ventilación (SERNAGEOMIN, 2008).

II.5.1 Cálculo de caudales de aire requeridos

La cantidad de aire que debe circular por las diferentes labores de una mina subterránea quedará determinada por las condiciones existentes en cada operación en particular y por el método de explotación utilizado. Este caudal debe ser capaz de satisfacer las necesidades de aire que tanto el personal como los equipos utilizados al interior mina requieren, así como también debe garantizar una renovación, dilución y control del aire viciado y de los contaminantes generados por la respiración humana, los motores de la maquinaria, los gases nocivos presentes de manera natural dentro de la mina, y las actividades, como tronadura y perforación, que generan gases y partículas en suspensión; todo lo anterior, normalizado bajo el decreto supremo N°132 “reglamento de seguridad minera” del ministerio de minería, y el decreto supremo N°594 “Reglamento sobre condiciones ambientales básicas en lugares de trabajo” del ministerio de salud (SERNAGEOMIN, 2008).

El caudal total requerido que es necesario garantizar en el sistema de ventilación quedará determinado por 6 caudales parciales principalmente:

- Caudal requerido por el número total de personas al interior mina.
- Caudal requerido por el desprendimiento de gases, acorde a la norma chilena.
- Caudal requerido por la temperatura existente al interior mina.
- Caudal requerido por el polvo en suspensión presente.
- Caudal requerido por el uso de explosivos.
- Caudal requerido por el uso de equipos diésel.

La formulación requerida para el cálculo de los caudales parciales utilizados en el presente trabajo (caudal por persona, por uso de explosivos, y por uso de equipo diésel), se detalla en el anexo N°1.

En base a lo anterior, el caudal total quedará determinado por la suma de los caudales calculados para cada una de las actividades desarrolladas al interior mina, incluyendo:

- a. La realización de perforación mecanizada.
- b. La carga de explosivos, acuñadora y otros trabajos desarrollados.
- c. Tronadura de avance y su tiempo de dilución.
- d. Tronadura de banqueo y su tiempo de dilución.

- e. Caudal requerido por producción.
- f. Actividades de carguío y transporte.

Producto de las filtraciones y pérdidas que pueden suceder dentro del circuito de ventilación, se recomienda utilizar un factor de aumento de caudal de 30% (SERNAGEOMIN, 2008).

III. ESTUDIO DE MERCADO

III.1 Análisis de la oferta

Si bien el uso de celdas de combustible como fuente energética alternativa no es algo común para la mayoría de los países en el mundo, su gran potencial, tanto energético como ambiental, ha hecho que cada vez más los países inviertan en su desarrollo y generen una normalización de su uso, pues ven en el hidrógeno el combustible del futuro.

Durante el año 2016, el uso de celdas de combustible y de hidrógeno como combustible ha aumentado no solo en los países que ya estaban desarrollando dichas tecnologías, sino que también ha logrado posicionarse en nuevas áreas comerciales. La infraestructura asociada a la distribución de hidrógeno aumentó con 92 nuevas estaciones de reabastecimiento y 83 centros de venta accesibles a todo cliente, siendo Japón el principal beneficiado con 45 nuevas estaciones seguido por California con 20. Respecto al envío realizado de celdas de hidrógeno a nivel mundial, este creció casi en 10,000 nuevos sistemas de celdas de combustible en comparación al año 2014, y en casi 2,000 en comparación al año 2015 (Fuel Cell and Hydrogen Energy Association, 2017). El detalle de dicho crecimiento y su distribución dependiendo del uso que se les dio se presentan en la figura 14.

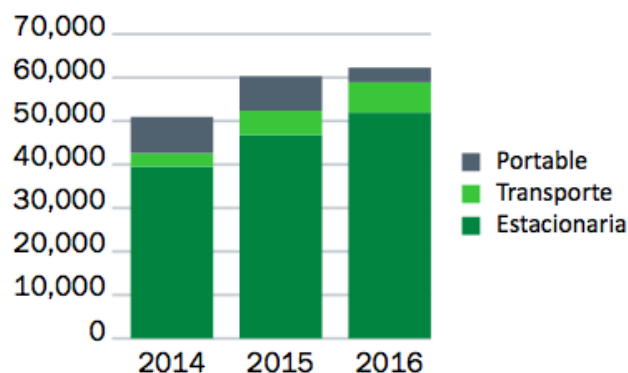


Figura 14. Cantidad de celdas de hidrógeno enviadas por año.
(Fuel Cell and Hydrogen Energy Association, 2017)

Respecto a la cantidad de megawatts producidos por celdas de hidrógeno enviadas a nivel mundial, estos aumentaron casi en 300 MW respecto al año 2014 y en 200 MW respecto al año 2015 (Fuel Cell and Hydrogen Energy Association, 2017). El detalle de dicho crecimiento y su distribución dependiendo del uso que se les dio se presenta en la figura 15.

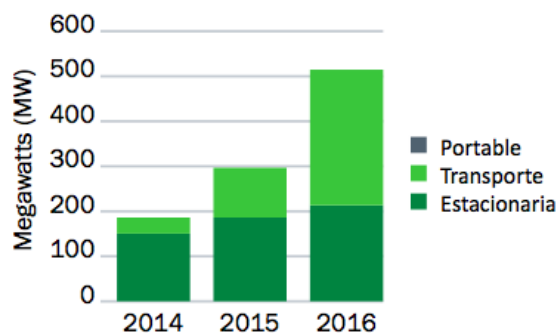


Figura 15. Cantidad de megawatts enviados por año.
(Fuel Cell and Hydrogen Energy Association, 2017)

Respecto a la cantidad de inversión destinada hacia compañías que desarrollan este tipo de tecnología, alcanzó un total de 355.8 millones de dólares entre los años 2014 – 2016 (Fuel Cell and Hydrogen Energy Association, 2017).

Si se analiza ahora la cantidad de celdas enviadas alrededor del mundo según el tipo de celda comercializada, las celdas del tipo PEM representan más de la mitad de los envíos realizados, sufriendo un pequeño retroceso respecto a años anteriores (E4Tech, 2016). El detalle de la cantidad de celdas enviadas y la cantidad de megawatts que representan se muestran en la figura 16 y 17 respectivamente.

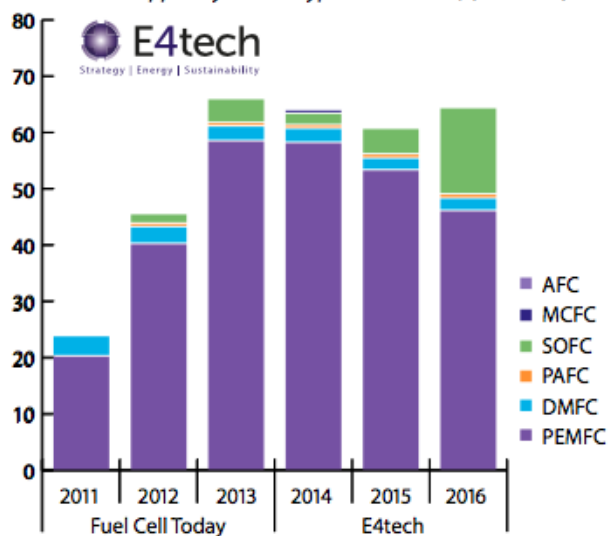


Figura 16. Celdas enviadas según el tipo de celda.
(E4Tech, 2016)

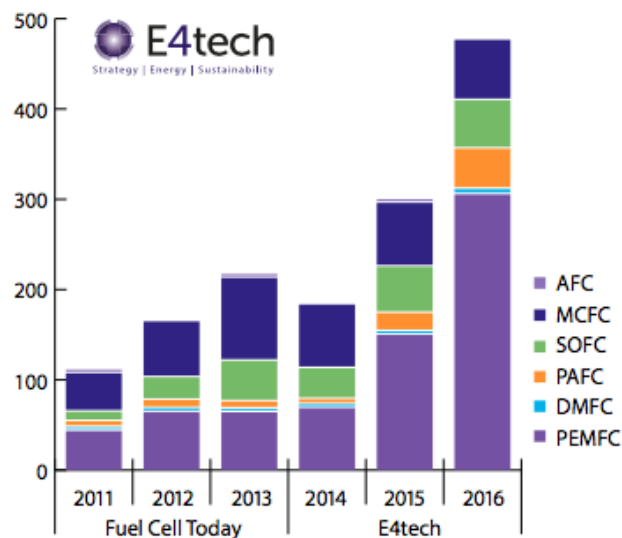


Figura 17. Cantidad de megawatts enviados según el tipo de celda.
(E4Tech, 2016)

En un alcance más local, si bien existen iniciativas relacionadas al uso de hidrógeno en transporte como en Brasil, Argentina y Chile, la producción de este o la manufactura y comercialización de celdas de combustible es bastante limitada. La producción de hidrógeno comercial en países de Latinoamérica se basa principalmente en producción de gas de hidrógeno por refinación de combustible (Hydrogen tools, 2016). Los detalles por país se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Producción de hidrógeno en Latinoamérica.

País	Productor	Capacidad (Kg/día)
Argentina	Air Liquide	33,242
Venezuela	Hyundai – Wilson	325,318
Venezuela	Linde (BOC)	120,488
Chile	Linde (BOC)	19,278
Perú	Praxair	28,917

Obtenida a partir de la información recopilada en estudio “Merchant hydrogen plant capacities in the rest of the world” (Hydrogen tools, 2016)

III.2 Análisis de la demanda

Desde el punto de vista del consumo energético destinado a minería, se espera que el consumo energético en este tipo de minería crezca en un 34.4% para el año 2027, pasando de 21.9 TWh a 29.5 TWh, como se muestra en la figura 18. De igual manera, y considerando las limitaciones y el aumento de demanda que se espera presente los principales sistemas de distribución energía eléctrica ante el desarrollo de nuevos proyectos mineros, se pronostica una necesidad de agregar una capacidad de generación de 1093 MW para el periodo 2017-2027 (Cochilco, 2016).

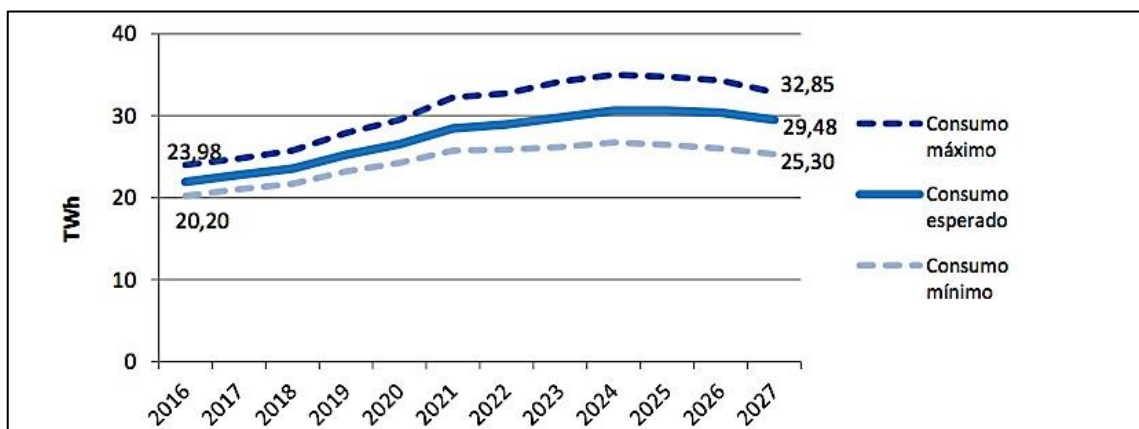


Figura 18. Consumo energético periodo 2017-2027.
(Cochilco, 2016)

Si se analizan ahora los cambios de paradigmas que ha presentado la industria minera en el último tiempo, fenómenos como el envejecimiento de los yacimientos actualmente en explotación y el aumento tanto en las distancias recorridas como en las profundidades alcanzadas, la reducción de las leyes minerales explotadas, y el aumento en la producción de concentrados debido a la alta explotación de sulfuros de cobre han provocado un aumento en el consumo unitario de energía requerida para producir una tonelada de cobre fino. En cifras, esto se traduce en un crecimiento del consumo energético promedio anual de 2.63%, una disminución promedio anual de 3.2% (Cochilco, 2017), y un aumento en la producción de concentrados para el año 2027 de un 32.1% (Cochilco, 2016), llevando finalmente a un aumento del consumo unitario cercano al 5.5%.

Analizando ahora la distribución que presenta el consumo energético dentro del rubro minero del cobre (ver figura 19), si bien la operación de minas subterráneas, donde se encuentra inmerso el gasto en ventilación de minas, presenta un consumo bastante menor en comparación a otros procesos como lo es la operación de minas a rajo abierto o el uso de plantas concentradoras, la distribución del uso de fuentes energéticas que se realiza, basada principalmente en energía eléctrica y en combustibles fósiles, se inclina abruptamente hacia el uso de combustibles derivados del petróleo (Cochilco, 2017), como se muestra en la figura 20, lo que conlleva a una mayor preocupación respecto a la emisión de gases nocivos que se pueden producir, generando así una demanda latente de alternativas energéticas libres de contaminación.

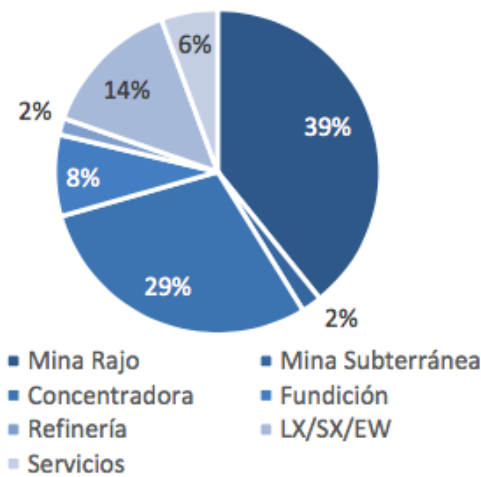


Figura 19. Distribución del consumo de energía en la minería del Cobre al año 2016.
(Cochilco, 2017)

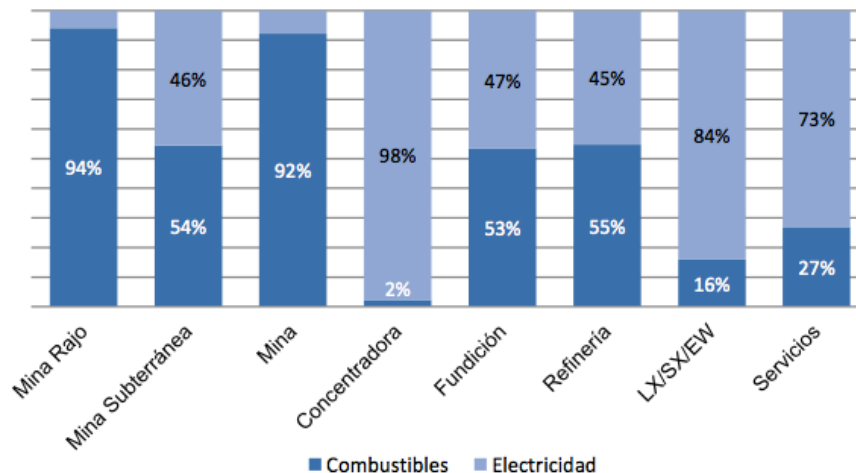


Figura 20. Porcentaje del consumo de energía eléctrica v/s combustible por área.
(Cochilco, 2017)

Si bien el porcentaje de energía eléctrica que se utiliza dentro de la minería subterránea sigue siendo alto, y por ende, la contaminación esperada no es tal, este panorama cambia cuando el acceso a los sistemas interconectados de energía eléctrica son limitados, como puede ocurrir en el caso de minas a mucha altura geográfica o en operaciones subterráneas a mucha profundidad cuyos recursos para la generación de nuevas conexiones son reducidos. En estos casos, se espera un aumento en el consumo de combustibles derivados del petróleo que dificultaría, y haría necesaria aún más, el uso de alternativas energéticas limpias como lo son las celdas de combustible.

III.3 Análisis estratégico

III.3.1 Análisis FODA

III.3.1.1 Fortalezas

Considerando las características internas que presenta las celdas de hidrógeno como fuente alternativa de energía, se puede apreciar la existencia de 2 características muy relevantes que le entregan una fortaleza importante, el nulo daño que su uso genera al medio ambiente, y la gran versatilidad y flexibilidad que su presentación entrega al momento de buscar una fuente energética portable.

Respecto al impacto negativo generado hacia el medio ambiente, el uso de celdas de combustible alimentadas por hidrógeno permite generar energía limpia sin contaminación, puesto que el funcionamiento y las reacciones involucradas que se llevan a cabo dentro de la celda solo generan como productos energía, calor y agua. Pese a lo anterior, si bien el funcionamiento de las celdas no genera contaminantes en sí misma, el modo en que se produzca el hidrógeno que alimenta a las celdas si puede contener componentes dañinos para el medio ambiente. En el caso de utilizar energías renovables como la solar o la eólica para la generación de hidrógeno (por ejemplo, apoyando procesos de hidrólisis), la reducción del dióxido de carbono que se produce, en comparación a otras fuentes de energía como los combustibles fósiles, es mayor, mientras que, si se utiliza como fuente el gas natural, dicha reducción disminuye drásticamente. Es importante destacar que, independiente del método que se utilice para la generación de hidrógeno, el uso de este en celdas de combustible sigue siendo más amigable con el medio ambiente en comparación a otras fuentes de energía.

Respecto a la flexibilidad que presenta este tipo de energía, el reducido tamaño que pueden alcanzar las celdas de combustible hace de estas una alternativa ideal para ambientes en los que el espacio y la accesibilidad coartan la posibilidad de uso de otro tipo de energía, como lo es el caso de operaciones mineras a gran altura o a importante profundidad. En la práctica, su tamaño puede abarcar desde el de un dispositivo móvil como un celular, hasta dimensiones similares a las de un motor de automóviles de combustión tradicional.

III.3.1.2 Oportunidades

En relación a las principales oportunidades existentes en el entorno minero para el uso de celdas de combustible, existen 3 características que potencian el uso de estas celdas en la industria, la preocupación ambiental existente por las autoridades locales respecto al uso de energía poco contaminante y el fomento constante a proyectos que busquen desarrollar dicho tipo de energía, las características territoriales con las que Chile cuenta en materia de energía solar y su potencial uso en la generación de hidrógeno, y la generación de agua producida por las celdas y el potencial uso que puede tener.

Dentro de las políticas energéticas de Chile, se considera como parte de los 4 pilares fundamentales el desarrollo de energía compatible con el medio ambiente, fijando como

objetivos alcanzar un 65% de generación de energía a partir de fuentes renovables para el año 2035, y un 70% para el año 2050 (Ministerio de energía de Chile, 2015), esperando implementar medidas que permitan el logro de ambas metas.

Paralelo a lo anterior, organismos gubernamentales nacionales han comenzado a impulsar la producción de hidrógeno a nivel nacional a través de iniciativas como la denominada “Desarrollo de Sistema de Combustión Dual Hidrógeno-Diesel para Camiones de Extracción Mineros (Caex)” (CORFO, s.f.), en la cual, si bien busca la integración de tecnologías basadas en el uso de hidrógeno aplicada a equipos de transporte del rubro minero, incentiva la producción de hidrógeno que puede, eventualmente, ser utilizada en actividades mineras complementarias, como lo es la ventilación.

Respecto a las características territoriales que presenta Chile para la producción de hidrógeno a través del uso de energías renovables no convencionales, antecedentes presentados bajo el marco de la conferencia internacional “Hidrógeno con Energías Renovables, nuevas oportunidades para Chile” muestran que el potencial solar con el que cuenta nuestro país en regiones como la de Atacama, ubicado sobre los 2500 KWh/m² al año y con 3000 horas promedio de sol, facilitan el desarrollo de energía solar como fuente energética para la obtención de hidrógeno a partir de hidrólisis (Programa energía solar, 2017). Por otra parte, la incorporación de proyectos de energías renovables destinados exclusivamente a la producción de energía para la minería, como lo es la planta “Pampa Elvira Solar” asociada a la división Gabriela Mistral de CODELCO (Ellaima, s.f.), o el parque eólico “El arrayan” destinado a abastecer la mina Los Pelambres (Antofagasta minerals, 2015), facilitan el desarrollo de puntos de producción de hidrógeno cercanos a proyectos mineros que podrían verse beneficiados por el uso de celdas de combustible en procesos como la ventilación de minas.

En cuanto a la generación de agua que presentan las celdas por su configuración, esta se puede presentar como fortaleza desde 2 aristas diferentes, una como parte esencial del proceso de generación de hidrógeno, y otra como complemento a actividades intensivas en agua en las que actualmente el recurso hídrico es escaso.

Desde el punto de vista de la producción de hidrógeno, y a modo teórico, la generación de agua con la que cuenta la celda permitiría crear un ciclo de producción de hidrógeno a partir de la misma, ya que podría ser la fuente primaria sobre la cual se extraiga hidrógeno por procesos de electrólisis (por supuesto considerando que para la primera producción de hidrógeno será necesaria la utilización de agua a partir de una fuente externa), produciendo finalmente que la obtención de agua para alimentar la producción de hidrógeno, que en ambientes mineros podría tornar dificultosa, no sea un problema con el paso del tiempo.

Desde el punto de vista del uso de agua para otras actividades, las características que presenta el agua producida bajo el funcionamiento normal de celdas de hidrógeno, le permiten ser usada en procesos de apoyo a maquinaria (por ejemplo, para humedecer barras de perforación o para contribuir en procesos de conminución), e incluso para el uso

del personal de la mina (como complemento a los sistemas de higiene o para el consumo bajo el tratamiento apropiado).

III.3.1.3 Debilidades

Analizando las potenciales debilidades que el uso de celdas de hidrógeno podría presentar, la principal característica negativa que presentan se relaciona con la falta de conocimiento que existe en nuestro país respecto a su uso, así como también la falta de implementación de este tipo de tecnología en otras actividades distintas al transporte.

Si bien en el país existen compañías dedicadas al rubro de las celdas de combustible y la producción de hidrógeno, como lo es el caso de HHO Chile o INDHO, el alcance que éstas poseen se limita solo al desarrollo y comercialización de tecnología e insumos destinados a la industria automotriz, dejando la implementación de este tipo de celda en sistemas de ventilación minera con un potencial muy por detrás al que se podría obtener en lugares como Estados Unidos, Canadá, o la Unión Europea.

Otra debilidad que podría llegar a presentar se relaciona con su ubicación, pues si bien se presentan como una fuente energética ideal para minas que presenten una dificultad en el acceso a otras fuentes energéticas, su sensibilidad ante variaciones de temperatura o cambios en la concentración de oxígeno presente en el aire hacen que en condiciones de gran altura o mucha profundidad requiera un cuidado especial, con el fin de evitar que los fenómenos previamente mencionados ocurran, por lo que si se utilizan en ambientes mineros con dichas características, deben ser controladas y monitoreadas con mayor frecuencia.

III.3.1.4 Amenazas

Analizando el ámbito de las amenazas que el entorno minero y nacional podría presentar para el desarrollo de celdas de combustible, el principal impedimento que podría afectar una futura integración de esta tecnología sería la resistencia al cambio y las bajas tasas de innovación y desarrollo que presenta el país.

Según cifras del ministerio de relaciones exteriores de Chile, al año nuestro país presenta un gasto interno bruto en innovación y desarrollo cercano a un 0.38% de nuestro PIB nacional, mientras que el promedio OCDE alcanza valores cercanos al 2.4%. En el caso del gasto empresarial destinado a innovación y desarrollo, este representa solo un 0.13%, mientras que el promedio OCDE asciende al 1.64% (Ministerio de relaciones exteriores, 2017).

En base a las cifras anteriores, si bien el desarrollo energético futuro de Chile considera como pilar fundamental el salto a una mayor dependencia de energías renovables limpias y eco-amigables, la falta de cultura de innovación y a baja cantidad de dinero destinada al desarrollo e incorporación de nuevas tecnologías producen que el potencial que podría

tener la inclusión de celdas de combustible como alternativa al uso de energías convencionales se vea mermado.

Cabe mencionar que otra posible amenaza que este tipo de tecnología podría presentar es la falta de desarrollo de la industria del hidrógeno, ya que, si bien el hidrógeno si posee presencia industrial en algunas actividades productivas del país, su desarrollo actual limita considerablemente que iniciativas basadas en el uso del mismo se lleven a cabo, ya que su producción no alcanza aún para crear una industria comercial del mismo.

IV. ESTUDIO TÉCNICO

IV.1 Localización

Considerando un análisis general de las condiciones requeridas para la instalación de celdas de hidrógeno, éstas deben contemplar requerimientos básicos de instalación como lo es el poseer cimientos firmes que permitan soportar el equipo a instalar, respetar la normativa de electricidad y de control de fuego aplicada a la zona donde se desea instalar la celda, y protección externa que garantice su resguardo de elementos externos como caída de material, nieve, condiciones climáticas adversas, y cualquier elemento que pueda causar daño a la maquinaria, así como también ubicarlas en lugares que no bloqueen los canales de ventilación de la misma y que no dificulten el paso de personas y/o maquinaria, alejándolas, a su vez, de cualquier tipo de material combustible que pueda presentar un riesgo (U.S. department of energy, 2004).

Respecto a instalación de celdas en zonas abiertas, es necesario garantizar que el equipo haya sido diseñado para su uso en ambientes abiertos, y garantizar al menos una distancia de 15 pies respecto a áreas que permiten la circulación y entrada de aire, y al menos a 10 pies de distancia del perímetro de edificios contiguos a la zona de instalación de la celda (U.S. department of energy, 2004).

Respecto a la instalación en zonas cerradas, el lugar donde se ubiquen las celdas de combustible debe contar con un ingreso de aire de recambio que permita reemplazar el aire viciado. Paralelo a lo anterior, se debe contar con un sistema de control que permita detectar fallas en el recambio de aire previamente mencionado (U.S. department of energy, 2004).

Especificaciones técnicas de carácter legal, así como inconvenientes que se podrían presentar en el uso de celdas insertas en ambientes de mina subterránea son detallados en las secciones IV.2 y IV.5 respectivamente.

IV.2 Marco legal asociado

Si bien en la actualidad no existe una ley o normativa chilena que regule exclusivamente el uso, desarrollo, instalación u operación de celdas de combustible y la producción de hidrógeno, es necesario regir su funcionamiento bajo las normas relacionadas al uso de gases industriales y al código de seguridad minera. Paralelo a lo anterior, es necesario también seguir los protocolos e indicaciones dictados en normativas aplicables a este tipo de tecnología de carácter internacional, como lo son las normas ASTM B31.3, NFPA N°2 y N° 853, y la norma ANSI FC3-2004 principalmente.

Para el contexto de Chile, la norma que rige el uso de gases industriales es la norma chilena NCH 1377, y en ella se establece las bases y definiciones de lo que es un gas industrial, sus características generales, los riesgos a los cuales se puede exponer, el mecanismo de

almacenamiento, manipulación y transporte, y las condiciones generales que deben cumplir los cilindros destinados para su almacenamiento (ASIMET, s.f.).

Por su parte, el decreto supremo 132 o “Reglamento de seguridad minera”, establece las directrices generales que debe seguir toda fuente de energía utilizada para labores mineras subterráneas, enfocándose principalmente en la regulación de voltajes máximos permitidos, las características de las instalaciones asociadas para la distribución de la energía generada, y los accesos que se tiene para acceder a las conexiones eléctricas (Ministerio de minería, 2002).

Respecto a las normativas internacionales, la norma estadounidense ASME B31.3 regula todo lo relacionado a la instalación de tuberías para el transporte de fluidos industriales, como es el caso del hidrógeno, detallando los criterios de diseño, selección de tuberías, materiales, accesorios, montaje e instalación, y controles necesarios para garantizar su correcto funcionamiento (ASME, s.f.).

En cuanto a las normativas NFPA, la N°2 se encarga de regular y entregar los parámetros de seguridad de todo lo relacionado al uso, instalación, almacenamiento, y manejo del hidrógeno gaseoso, mientras que la N° 853 establece los requerimientos de seguridad que deben cumplir los edificios e instalaciones que utilicen celdas de combustible como fuente de energía estacionaria (NFPA, 2017).

Finalmente, respecto a la norma ANSI FC3-2004, ésta regula el uso, la instalación, la ubicación y el control que se debe ejercer sobre celdas de hidrógeno como fuente de energía portable (Hydrogen tools, s.f.).

IV.3 Disponibilidad de insumos necesarios

Para poder llevar a cabo la implementación de tecnologías energéticas basadas en celdas de combustible, es necesario garantizar que existe disponibilidad elementos primordiales para su desarrollo, como lo es el hidrógeno, los elementos requeridos para iniciar su producción (ya sea mediante hidrólisis o mediante ciclos termoquímicos), y las celdas de hidrógeno en sí mismas.

En el caso de la venta de hidrógeno, en Chile existen algunas empresas dedicadas a su venta a través de la comercialización de gases industriales, como es el caso de Air liquide Chile (Air liquide, s.f.), Proingas (Proingas, s.f.), Y Praxair (Praxair, s.f.) , entre otras, sin embargo, su uso y comercialización se destina principalmente a la realización de soldaduras y desulfuración de combustibles, por lo que su producción es limitada y no cumple necesariamente con las características requeridas para su uso en celdas de hidrógeno, ya que suele ser mezclado con otros gases para lograr un mejor desempeño del trabajo deseado.

Producto de lo anterior, si se analiza ahora la disponibilidad de los recursos necesarios para la producción autónoma de hidrógeno, es necesario contemplar la existencia de fuentes de energía renovable no convencionales que permitan un desarrollo de hidrógeno verde, celdas de electrólisis que permitan la formación de H₂ bajo este mecanismo, y reactores e insumos necesarios para la generación de ciclos termoquímicos, en caso de optar por esta segunda opción.

En el caso de fuentes energéticas renovables que permitan la generación de energía limpia, es necesario estudiar la capacidad instalada tanto de energía eólica como solar. Para el primer tipo de energía, si bien Chile se encuentra en segundo lugar con aproximadamente 1298 MW respecto a los demás países de América del Sur (sólo superado por Brasil con 10,740 MW), aún se encuentra distante de países líderes en la implementación de este tipo de tecnología como lo son China, Alemania o Estados Unidos con 148,640 MW, 49,747 MW, y 81,312 MW respectivamente. Para el caso de la energía solar, Chile lidera la capacidad producida en América del Sur con 1603 MW, pero sigue quedando en segundo plano respecto a China, Alemania y Estados Unidos con 77,434 MW, 40,988 MW, y 34,711 MW respectivamente (IRENA, 2017).

Si se analiza ahora el potencial eólico estimado, según la cartera de proyectos vigentes con la que cuenta Chile y cuyos factores de planta son mayores a 0.3, es de 2,975 megawatts (Ministerio de energía de Chile, 2014), el cual se distribuye por regiones según lo indicado por la tabla 4.

Tabla 4. Potencial eólico por región o zona.

Región o zona	Capacidad (MW)	Factor de planta
De Antofagasta (sin Taltal)	240	0,37
Taltal	99	0,41
De Atacama	533	0,34
De Coquimbo	777	0,35
De Valparaíso	21	0,40
Del Biobío	419	0,32
De La Araucanía	407	0,38
De Los Ríos	51	0,39
Isla Grande de Chiloé	428	0,39
Total	2.975	0,36

(Ministerio de energía de Chile, 2014)

En esta misma línea, el potencial solar generado por plantas solares fotovoltaicas cuyos factores de planta son mayores a 0.24 (arreglo fijo) y mayores a 0.3 (arreglo con seguimiento), alcanzan un total de 1,237,903 y 1,640,128 megawatts respectivamente, con una superficie total de 6,189,517 y 8,200,641 hectáreas cada uno (Ministerio de energía de Chile, 2014). El detalle respecto a la distribución de dicho potencial en regiones se presenta en la tabla 5.

Tabla 5. Potencial solar por región o zona.

Región	Arreglo fijo		Arreglo con seguimiento	
	Superficie (ha)	Capacidad (MW)	Superficie (ha)	Capacidad (MW)
De Arica y Parinacota	104.015	20.803	205.024	41.005
De Tarapacá	309.163	61.833	1.055.670	211.134
De Antofagasta	4.995.313	999.063	6.003.064	1.200.613
De Atacama	769.467	153.893	920.363	184.073
De Coquimbo	11.442	2.288	16.201	3.240
De Valparaíso	117	23	319	64
Metropolitana de Santiago				
Del L. G. Bernardo O'Higgins				
Del Maule				
Del Biobío				
De la Araucanía				
De Los Ríos				
De Los Lagos				
Total	6.189.517	1.237.903	8.200.641	1.640.128

(Ministerio de energía de Chile, 2014)

Respecto a la disponibilidad de celdas de electrólisis en el país, si bien su desarrollo para la producción de hidrógeno como combustible de celdas de combustible aún no ha sido estudiado en detalle, la tecnología, y su implementación dentro de faenas y zonas de minería existe hace bastante tiempo en el país, pues su uso ya se encuentra normalizado en procesos de electro-obtención de cobre a partir de procesos hidrometalúrgicos, por lo que un desarrollo de éstas para producción de hidrógeno como combustible no debería implicar mayores dificultades prácticas.

En relación a la generación de hidrógeno mediante ciclos termoquímicos, los insumos requeridos para su desarrollo se limitan a la presencia de reactores, nucleares o termo-solares, que permitan alcanzar las temperaturas requeridas, y de los reactivos requeridos para cada ciclo contemplado en el marco teórico, los cuales se detallan en la tabla 6.

Tabla 6. Ciclos termoquímicos y sus principales reactivos.

Ciclo termoquímico	Reactivos requeridos
Híbrido de azufre	Ácido sulfúrico
Yodo – Azufre	Yodo, dióxido de azufre, agua
Óxido de zinc	Óxido de zinc, agua
Óxido de cadmio	Óxido de cadmio, agua
Óxido de hierro	Óxido de hierro, magnetita
Óxido de cerio	Óxidos de cerio, agua
Sodio – Manganeseo	Óxido de manganeso, hidróxido de sodio
Ferritas	Magnetita
Híbrido cobre – clorhídrico	Cobre, cloruro de sodio, agua

(Fuente: elaboración propia)

Respecto a la presencia de reactores, si bien no existe una industria dedicada a la comercialización de éstos con fines de producción de hidrógeno, si son ocupados en otros procesos y actividades dentro del país, como es el caso de los reactores nucleares ubicados en la comuna de La Reina y Lo Aguirre (Comisión chilena de energía nuclear, s.f.) utilizados como centros de estudio, y en el caso de los reactores termo-solares aquellos utilizados en los proyectos Copiapó y Tamarugal de la empresa Solarreserve (Solarreserve, s.f.), lo que permite inducir que un potencial desarrollo de esta tecnología para la producción de hidrógeno no implicaría trabajar sobre tecnología del todo desconocida.

En cuanto a la disponibilidad de los reactivos requeridos para la realización de los ciclos, al ser en su mayoría químicos industriales, su venta y comercialización ya se realiza en el país, siendo sus principales comercializadores compañías como PQC (Productos químicos Chile, s.f.), QI (Química industrial, s.f.), y Quimetal (Quimetal, s.f.). En el caso de minerales como el cobre o la magnetita, estos también pueden ser encontrados de forma natural.

Pasando finalmente a la disponibilidad y comercialización de celdas de hidrógeno, si bien en Chile existen compañías como HHO (HHO, s.f.) o Hidrógeno Automotriz (Hidrógeno automotriz, s.f.) que venden celdas destinadas al uso en automóviles, éstas son principalmente del tipo híbrido, en las que se requiere el uso de combustibles fósiles, y por ende, generan contaminación, por lo que si se estima utilizar celdas de combustible que utilicen inyección de hidrógeno directa, es necesario estudiar la exportación de estas de países cuya industria del hidrógeno se encuentra más desarrollada, como es el caso de Estados Unidos y Canadá, entre otros (Fuel Cell and Hydrogen Energy Association, 2017).

IV.4 Capacidad de generación energética

IV.4.1 Definición de escenarios a estudiar

Para simular el funcionamiento real que tendría un sistema de ventilación de minas y los caudales de aire que se requerirían, se establecen 3 escenarios ficticios que describen a modo general el funcionamiento de una mina pequeña, una mina de mediana envergadura, y el desarrollo de un bloque de producción de una mina de gran escala.

IV.4.1.1 Escenario N°1

- Método de explotación: Explotación de pequeña minería, con perforaciones de 3m de profundidad. Se presumen actividades de tronadura con 3 metros de avance.
- Forma galerías: arqueada
- Alto galerías: 2 metros
- Ancho galerías: 2 metros
- Área galerías: 3.8 metros cuadrados
- Largo total galerías: 730 metros
- Altitud: 1500 m.s.n.m
- Profundidad: 0 metros
- Cantidad de personas: 4
- Tipo y cantidad de maquinaria: no aplica
- Caudal estimado: 213 m³/min
- Cantidad de ventiladores principales: 0
- Cantidad de ventiladores auxiliares: 4 con requerimiento energético de 20.2 KW cada uno.

IV.4.1.2 Escenario N°2

- Método de explotación: sección tipo Sublevel stoping, con nivel de perforación, nivel de producción con 3 estocadas y nivel de transporte.
- Forma galerías: arqueada
- Alto galerías: 3 metros
- Ancho galerías: 4 metros
- Área galerías: 11.25 metros cuadrados
- Largo total galerías horizontales: 1790 metros
- Altitud: 1500 m.s.n.m
- Profundidad: 130 metros
- Cantidad de personas: 6
- Tipo y cantidad de maquinaria:
 - LHD Cat R1300G x 3
 - Camión bajo perfil Cat AD30 x 3
- Caudal estimado: 6370 m³/min
- Cantidad de ventiladores principales: 1 (176 KW)

- Cantidad de ventiladores auxiliares: 4 (22.1 KW)

IV.4.1.3 Escenario N°3

- Método de explotación: bloque de método block caving, con nivel de producción (15x16,5) de 3 calles y 7 líneas de zanja, nivel de ventilación, y nivel de transporte.
- Forma galerías: arqueada
- Alto galerías: 4 metros
- Ancho galerías: 4 metros
- Área galerías: 15 metros cuadrados
- Largo total galerías: 5130 metros
- Altitud: 1500 m.s.n.m
- Profundidad: 260 metros
- Cantidad de personas: 8
- Tipo y cantidad de maquinaria:
 - LHD Cat R1600H x 3
 - Camión bajo perfil Cat AD45B x 3
- Caudal estimado: 9615 m³/min
- Cantidad de ventiladores principales: 1 (155 KW)
- Cantidad de ventiladores auxiliares: 4 (22.1KW)

La distribución espacial y el diseño desarrollado en el software Ventsim ® se presentan en el anexo N°2.

Cabe mencionar que, para los escenarios previamente descritos, tanto el escenario N°2 como el N°3 no consideran el uso de explosivos, y que la base para el cálculo de caudales no considera ni emisiones de gases propios de la mina, ni la producción que la operación tenga. Los datos considerados para el diseño de todos los escenarios son en su mayoría ficticios, por lo que su aplicación en condiciones reales quedará sujeta a la modificación de los inputs que permitan describir de mejor manera el escenario que se busca analizar.

IV.4.2 Capacidad de generación de energía

Dependiendo del tipo de celda utilizada, el número de celdas agrupadas en stacks, y del tamaño de éstas, pueden presentar una capacidad de generación de energía muy variada.

Las celdas de combustible del tipo PEM pueden alcanzar potencias desde 1 hasta 100 KW (Fuel Cell Technologies Office, 2015), siendo su uso destinado principalmente a fuentes de poder de reserva, fuentes de energía portátil y algunos vehículos livianos. Dependiendo del uso que se quiera dar a estas celdas, se pueden encontrar también capacidades entre los 200 y 2800 KW en el caso de celdas industriales, 105 a 210 KW en el caso de celdas destinadas exclusivamente a la generación de energía (excluyendo la generación de calor), 3 a 10 KW en el caso de celdas destinadas al uso residencial, y 0.25 a 5 KW en el caso de baterías portables pequeñas (U.S. Environmental Protection Agency, 2015).

En un contexto más nacional, y según estudios relacionados a la incorporación de celdas de combustible en Chile, se estima una potencia para celdas de combustible entre el rango de 10 a 745 KW (CORFO).

IV.4.3 Energía requerida por los escenarios simulados

Considerando como línea base el consumo que presentan los ventiladores incluidos por defecto dentro del software de ventilación Ventsim ® y los caudales bajo los cuales estos son utilizados, se establece una relación entre los m³/min de caudal requerido y la potencia absorbida por los ventiladores en KW como se exhibe en la figura 21 para el caso de los ventiladores principales, y en la figura 22 para el caso de los ventiladores de tipo auxiliar. Los datos utilizados para la confección de gráficos se presentan en el anexo N°3.

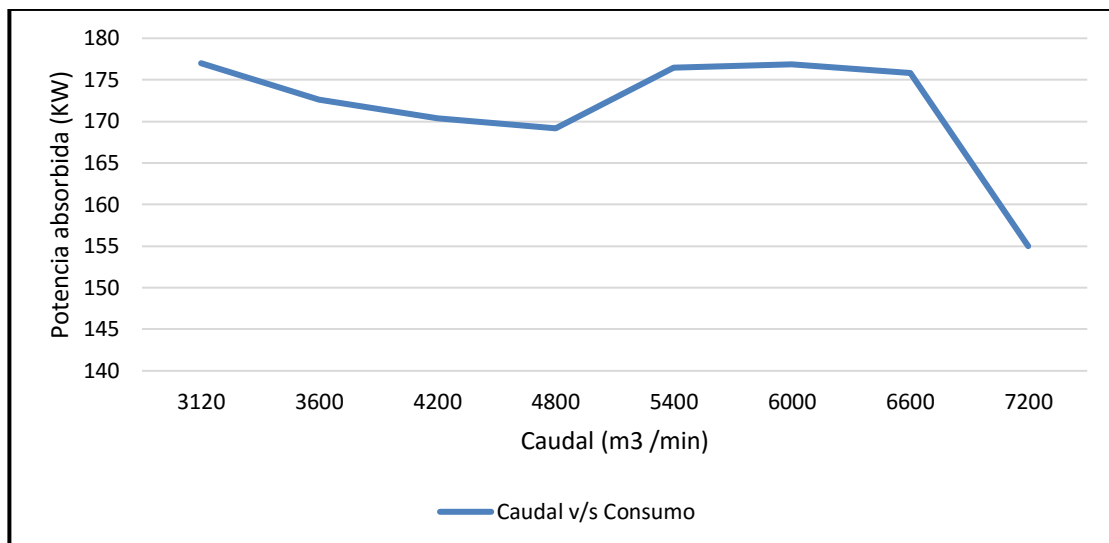


Figura 21. Caudal requerido v/s potencia absorbida para ventiladores principales.
(Fuente: elaboración propia)

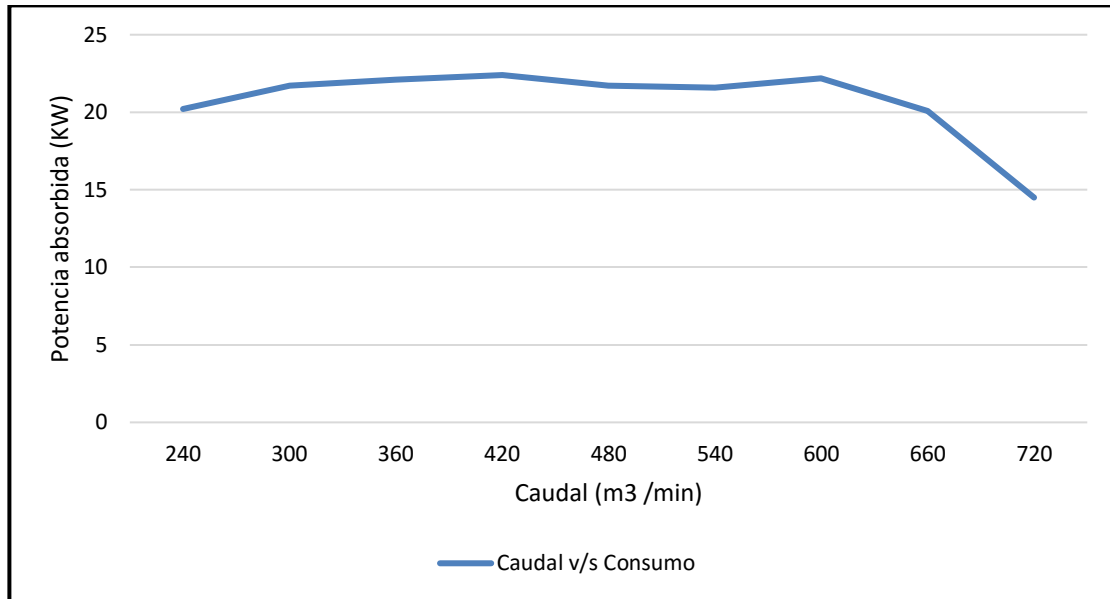


Figura 22. Caudal requerido v/s potencia absorbida para ventiladores auxiliares pequeños.
(Fuente: elaboración propia)

En base a los escenarios previamente definidos para simulación y considerando los caudales de aire requeridos estimados de acuerdo a sus características, se realiza la simulación el proceso de ventilación con el fin de determinar la cantidad de ventiladores principales y auxiliares requeridos, y de esa manera estimar el gasto energético asociado a su funcionamiento. Los resultados obtenidos se adjuntan en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados de simulación.

Escenario	Caudal estimado (m³/min)	Potencia requerida (KW)
1	213	80.8
2	6370	264.4
3	9615	243.4

(Fuente: elaboración propia)

IV.5 Operatividad en entorno minero

Entendiendo que el uso de celdas de hidrógeno en ventilación subterránea implica su operación en ambientes cerrados, con baja disponibilidad de oxígeno, y con presencia de diversas partículas en suspensión y gases propios de la actividad minera, es necesario analizar si dicho entorno permite su funcionamiento normal.

Bajo este contexto, (Marc C. Bétournay, 2004), plantea en su estudio sobre el uso de celdas de combustible en vehículos de producción para operaciones mineras subterráneas, los

resultados que el impacto de factores como la temperatura, humedad, presencia de polvo, gases y vibraciones producidas por tronadura, y corrosión de materiales podrían tener en el desempeño y la vida útil de la celda de combustible, considerando para éste el uso de celdas de hidrógeno del tipo PEM durante un periodo de 12 días.

Los resultados obtenidos tras la realización del estudio, muestran que el desempeño de las celdas de hidrógeno puede verse afectado por factores como la falta de oxígeno y presencia de contaminantes, los cambios de temperatura, y la acumulación de polvo y partículas en suspensión dentro de la celda.

En el caso de la falta de oxígeno y presencia de gases contaminantes, el estudio muestra que cuando, producto de mala ventilación, los niveles de O_2 alcanzan concentraciones bajo un 17.5%, la celda comienza fallar hasta detener su funcionamiento. Sin embargo, si se expone esta nuevamente a un ambiente con aire fresco, esta vuelve a funcionar normalmente. En el caso de los cambios de temperatura, este afecta el comportamiento de las celdas de manera similar a lo que ocurre ante falta de oxígeno.

Respecto a la acumulación de polvo y partículas en suspensión, el impacto que se pueda generar dependerá de su acumulación y el uso de filtros que se incluyan en la celda, pues si bien con filtros el desempeño se mantiene estable, la acumulación de polvo por falta de éstos podría causar una disminución en el desempeño normal de la celda.

V. ESTUDIO ECONÓMICO – FINANCIERO

V.1 Costo general de celdas de hidrógeno tipo PEMFC

Para el análisis de costo asociado directamente a la construcción de una celda de hidrógeno, se toma en consideración tanto el costo de los componentes de la celda, como la inversión que se debe realizar para la construcción del stack de baterías y de la planta asociada. Si bien se considera el uso de celdas para medios de transporte, el tipo de celda estudiado y sus características son homologables al tipo de fuente energética que se espera utilizar en un ambiente minero, siendo estas descritas en la tabla 8.

Tabla 8. Principales características de celda analizada.

Característica	Valor
Densidad de potencia (MW/cm ²)	749
Potencia neta (KW neto)	80
Voltaje de celda (V)	0.659
Presión de operación (atm)	2.5
Temperatura de stack (°C)	94
Celdas activas	379
Material de membrana	Nafion en 17-micron ePTFE
Radiador	Radiador de aluminio con refrigerante de agua/glicol
Platos bipolares	Sellado SS 316L con revestimiento tipo TreadStone LItCell™ (Gen2)
Capas de difusión de gases	Capa de papel de carbón con macroporos con capa de microporos
Catalizador	Cátodo: 0.116 MgPt/cm ² Ánodo: 0.018 MgPt/cm ²

(Strategic analysis inc., 2017)

Para el análisis de los costos asociados a la conformación del stack de celdas de combustible, son considerados parámetros como la conformación de la membrana, los platos bipolares, el ensamblaje y el acondicionamiento realizado, entre otros, teniendo valores totales cercanos a 12,255 USD para producciones de celdas de 1,000 unidades, y 2,199 USD para producciones de celdas de 500,000 unidades (Strategic analysis inc., 2017). El detalle del costo total se detalla en la tabla 9.

Tabla 9. Detalle costos relacionados a celdas y stacks.

Parámetro	Unidad	Valor					
Tasa de producción anual	Sistemas/año	1,000	10K	30K	80K	100K	500K
Platos bipolares	USD/stack	1,985	772	696	668	658	653
Membranas	USD/stack	3,167	961	589	386	351	191
Catalizador	USD/stack	2,307	1,326	1,052	973	957	928
Lavado ácido CMM	USD/stack	506	51	34	17	19	14
GDL	USD/stack	2,602	596	328	213	196	129
Planchado de membrana y electrodos	USD/stack	39	17	17	10	10	9
Corte de membrana y electrodos	USD/stack	0	22	10	5	4	3
Sub-ensamblaje de membrana	USD/stack	917	272	152	126	124	115
Ensamblaje de refrigerante	USD/stack	410	53	53	40	38	37
Terminaciones de ensamblaje	USD/stack	1	1	1	1	1	0
Colector de corriente	USD/stack	8	7	7	7	7	6
Bandas de compresión	USD/stack	10	9	8	6	6	5
Cubierta de stack	USD/stack	64	13	9	8	7	6
Ensamblaje de stack	USD/stack	80	61	42	36	35	34
Acondicionamiento de stack	USD/stack	60	18	18	16	16	13
Costo total de stacks	USD/stack	12,255	4,259	3,087	2,575	2,493	2,199
Costo total de stacks (neto)	USD/KW neto	153.19	53.23	38.58	32.19	31.16	27.49

Tabla construida a partir de los datos expuestos en “Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2016 Update” (Strategic analysis inc., 2017).

Para el análisis de los costos asociados a la formación de plantas de celdas de combustible, son considerados parámetros como los ciclos de aire, de combustible, temperatura y sensores, entre otros, teniendo valores totales cercanos a 4,833 USD para producciones de celdas de 1,000 unidades, y 1,932 USD para producciones de celdas de 500,000 unidades (Strategic analysis inc., 2017). El detalle del costo total se detalla en la tabla 10.

Tabla 10. Costo detallado instalación planta.

Parámetro	Unidad	Valor					
Tasa de producción anual	Sistemas/año	1,000	10K	30K	80K	100K	500K
Ciclo de aire	USD/sistema	1,813	1,394	1,095	951	920	891
Ciclo de recuperación de agua	USD/sistema	1,176	274	158	128	119	90
Ciclo de refrigerante de alta temperatura	USD/sistema	480	446	417	369	352	330
Ciclo de refrigerante de baja temperatura	USD/sistema	71	68	65	61	59	56
Ciclo de combustible	USD/sistema	346	306	291	261	251	238
Controlador del sistema	USD/sistema	172	152	138	103	97	83
Sensores	USD/sistema	512	290	226	184	176	131
misceláneos	USD/sistema	263	165	136	123	119	115
Costo planta total	USD/sistema	4,833	3,094	2,572	2,181	2,092	1,932
Costo planta total neto	USD/KW neto	60.41	38.68	31.58	27.27	26.15	24.14

Tabla construida a partir de los datos expuestos en “Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2016 Update” (Strategic analysis inc., 2017).

V.2 Estimación de costos de producción de hidrógeno

V.2.1 Producción de hidrógeno bajo procesos de electrólisis

Entendiendo como principal costo asociado al proceso de hidrólisis el uso de energía para lograr la disociación de la molécula de agua, el costo que tendrá el hidrógeno producido por este método quedará definido casi en su totalidad por el costo de la energía eléctrica utilizada para su formación.

Bajo esta perspectiva, el costo que alcanzaría la producción de hidrógeno en función del costo que tiene la electricidad queda definido por la gráfica exhibida en la figura 23.

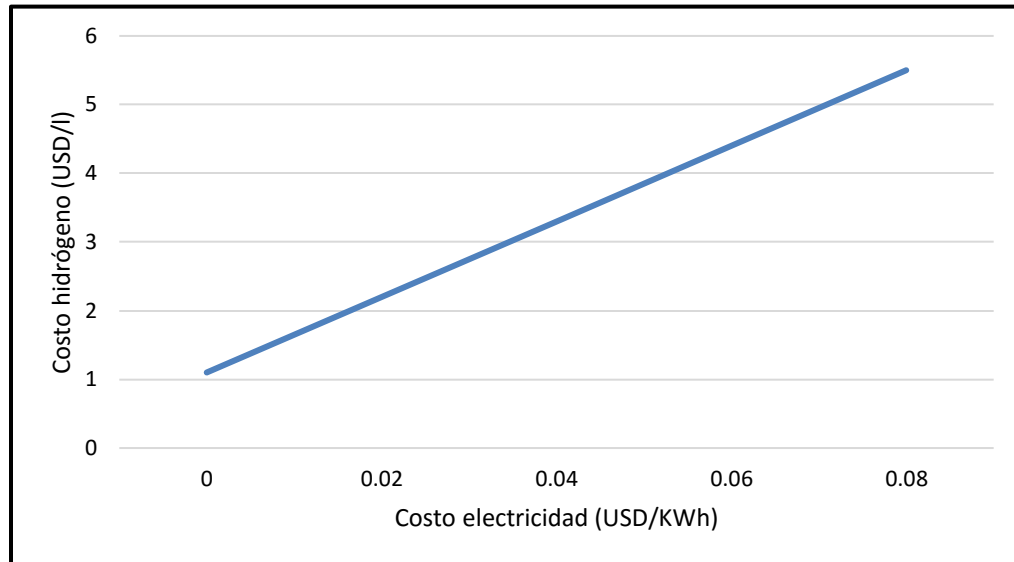


Figura 23. Costo del hidrógeno en función del costo de la electricidad.
(Siemens, 2017)

Considerando lo anterior, si llevamos el costo de la electricidad al costo que representa generar dicha energía a través de energías alternativas como la eólica o la solar, el costo del hidrógeno se traduce finalmente en 7.81 USD/l y 5,67 USD/l respectivamente.

Según el tipo de energía utilizada para el proceso de electrólisis, se estima para el año 2020 un costo de producción entre los 2 y 4 USD/Kg de hidrógeno producido dependiendo del método de producción utilizado (J. Plou, 2014). El detalle se presenta en la tabla 11.

Tabla 11. Costo de producción según proceso de electrólisis.

Método de producción	Costo (USD/Kg)
Electrólisis a partir de red	2.30
Reformado de líquidos orgánicos	2.30
Electrólisis por energías renovables	2.00
Gasificación de biomasa	2.00
Uso de energía solar termoquímica	3.70
Uso de célula fotoelectroquímica	5.70

Tabla construida a partir de la información publicada en “Perspectiva sobre la producción de hidrógeno por métodos emergentes basados en energía solar y de alta temperatura” (J. Plou, 2014)

V.2.2 Producción de hidrógeno bajo procesos de ciclos termoquímicos

El costo que tenga el hidrógeno producido bajo el desarrollo de ciclos termoquímicos, va a depender de la energía destinada para generar las temperaturas requeridas en el reactor, el costo del reactor, y el costo de los reactivos requeridos para formar las reacciones químicas necesarias.

Dependiendo del ciclo termoquímico utilizado, la producción de hidrógeno tendrá diferentes valores, siendo algunos aún desconocidos producto del temprano desarrollo experimental en el que algunos ciclos se encuentran. Los detalles se presentan en la tabla 12.

Tabla 12. Costo producción hidrógeno a partir de ciclos termoquímicos.

Ciclo termoquímico	Costo producción (USD/Kg H₂)
Híbrido de azufre	4.5 – 6.5
Yodo - Azufre	3.5 – 5.8
Óxido de zinc	5.8 – 17.1
Óxido de cadmio	Sin información
Óxido de hierro	Sin información
Óxido de cerio	Sin información
Sodio - Manganeseo	Sin información
Ferritas	Sin información
Híbrido cobre - clorhídrico	Sin información

Tabla construida a partir de los datos recopilados en “Estudio de alternativas para la producción de hidrógeno con ciclos termoquímicos y energía solar térmica de alta temperatura” (Martín, 2012)

V.3 Análisis comparativo de costos de utilización respecto a energías renovables no convencionales

Tomando como base el costo nivelado de energía (LCOE por sus siglas en inglés) que representa el valor que se paga por la producción de cierto tipo de energía considerando todos los costos en los que se incurre durante la vida útil del proyecto, como lo son el costo de inversión inicial, de operación, y de mantenimiento, entre otros (Natural Resources Defense Council, 2013), se realiza un análisis comparativo que permita determinar la conveniencia o no del uso de celdas de combustible respecto al uso de otras energías renovables alternativas como lo son la solar o la eólica.

La relación generada entre el caudal de aire requerido en m³/min y el costo nivelado global asociado para cada fuente energética analizada se presenta en la figura 24 para el caso de los ventiladores principales, y en la figura 25 para el caso de los ventiladores auxiliares. Se considera un costo nivelado promedio para la energía solar de aproximadamente 50 USD/MWh, para la energía eólica de 45 USD/MWh, y para las celdas de combustible de

137 USD/MWh (Lazard, 2017). Los datos utilizados para la confección de gráficos se presentan en el anexo N°4.

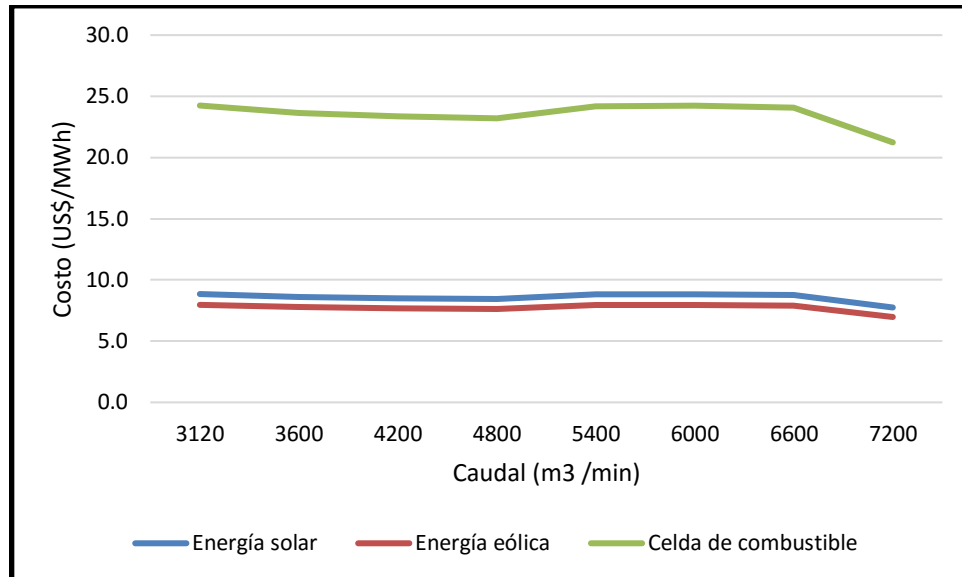


Figura 24. Caudal v/s costo global para ventiladores principales bajo el uso de energía solar, eólica y celdas de combustible.
(Fuente: elaboración propia)

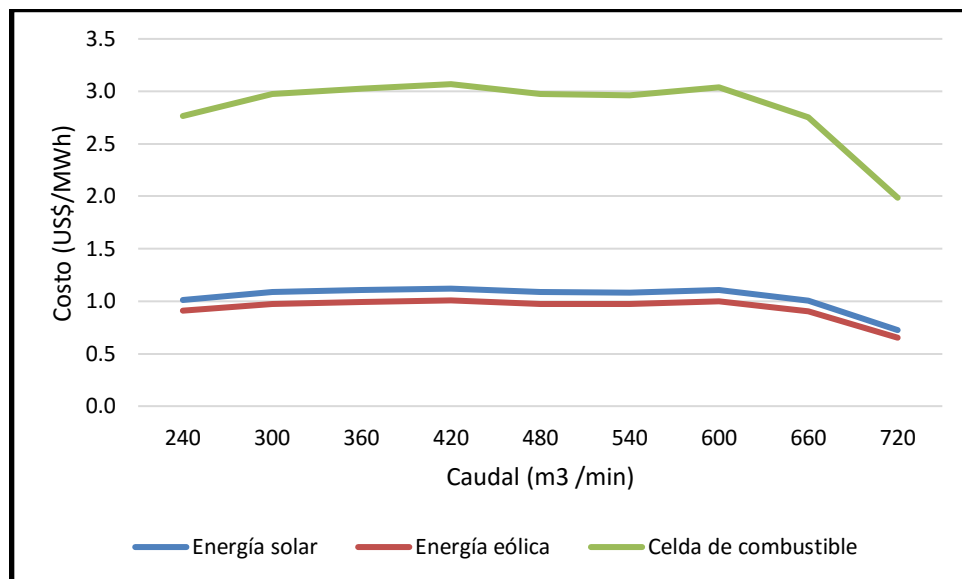


Figura 25. Caudal v/s costo global para ventiladores auxiliares bajo el uso de energía solar, eólica y celdas de combustible.
(Fuente: elaboración propia)

El costo global que representaría utilizar cada tipo energía de acuerdo a la potencia requerida por cada uno de los escenarios simulados se presenta en la tabla N°13.

Tabla 13. Cuadro comparativo costo global asociado al uso de energía.

Escenario	Requerimiento energético (KW)	Tipo de energía	Costo (USD/hr)
1	80.8	Solar	4.04
		Eólica	3.64
		Celda de combustible	11.07
2	264.4	Solar	13.22
		Eólica	11.90
		Celda de combustible	36.22
3	243.4	Solar	12.17
		Eólica	10.95
		Celda de combustible	33.35

(Fuente: elaboración propia)

Si se considera ahora la relación generada entre el caudal de aire requerido en m³/min y el costo nivelado local asociado para cada fuente energética dentro del contexto chileno, los valores previamente obtenidos difieren en algunos aspectos, mostrándose los resultados en la figura 26 para el caso de los ventiladores principales, y en la figura 27 para el caso de los ventiladores auxiliares. En este caso, se utiliza un costo nivelado promedio para la energía solar de aproximadamente 210.84 USD/MWh (Saavedra, 2015), para la energía eólica de 138.7 USD/MWh (Saavedra, 2015), y manteniendo un costo nivelado para las celdas de combustible de 137 USD/MWh (Lazard, 2017).

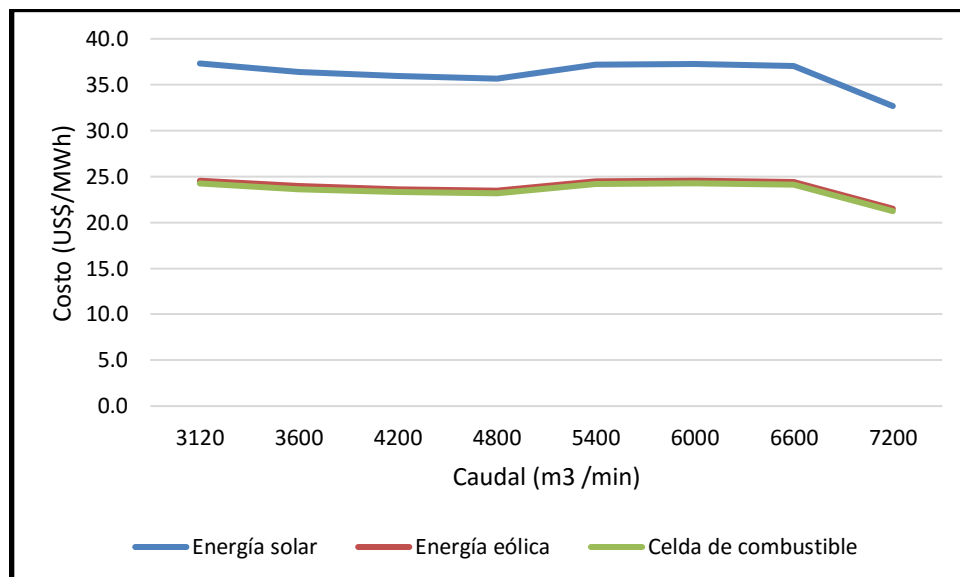


Figura 26. Caudal v/s costo local para ventiladores principales bajo el uso de energía solar, eólica y celdas de combustible.

(Fuente: elaboración propia)

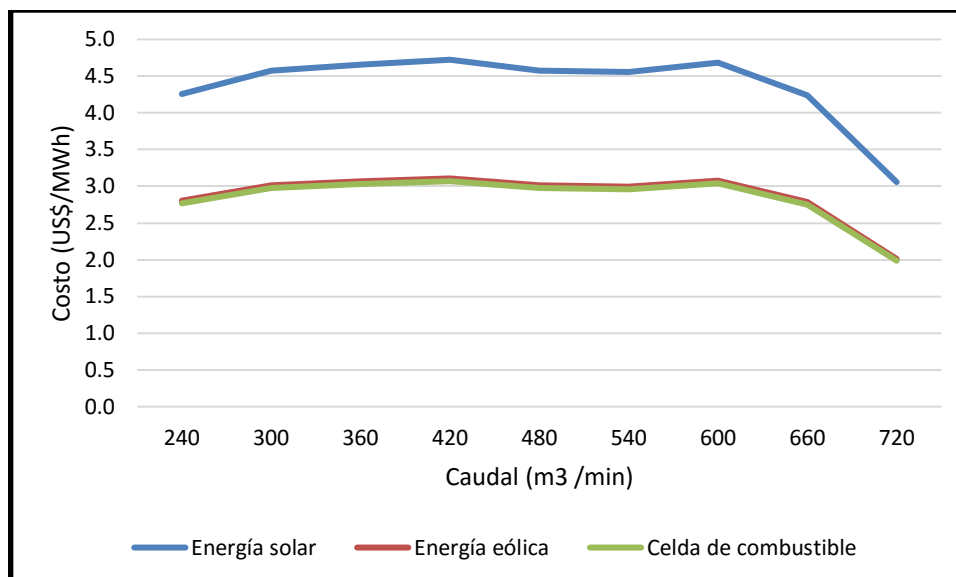


Figura 27. Caudal v/s costo local para ventiladores auxiliares bajo el uso de energía solar, eólica y celdas de combustible.

(Fuente: elaboración propia)

El costo local que representaría utilizar cada tipo energía de acuerdo a la potencia requerida por cada uno de los escenarios simulados se presenta en la tabla N°14.

Tabla 14. Cuadro comparativo costo local asociado al uso de energía.

Escenario	Requerimiento energético (KW)	Tipo de energía	Costo (USD/hr)
1	80.8	Solar	17.04
		Eólica	11.21
		Celda de combustible	11.07
2	264.4	Solar	55.75
		Eólica	36.67
		Celda de combustible	36.22
3	243.4	Solar	51.32
		Eólica	33.76
		Celda de combustible	33.35

Fuente: elaboración propia

Cabe mencionar que, para la estimación de costo local, tanto para la energía solar como para la eólica, se asume una participación dentro del sistema interconectado central del 15% (Saavedra, 2015).

V.4 Análisis comparativo de costos de utilización respecto a combustible diésel y fuente energética actual

Considerando ahora el costo que representa el uso de energía producida por celdas de combustible en comparación al costo que representa usar combustible diésel, principal combustible fósil utilizado en minería subterránea (Cochilco, 2017), y al costo que representa usar energía directamente de los sistemas interconectado central (SIC) e interconectado del norte grande (SING), se puede apreciar que existe una diferencia respecto al análisis bajo la comparación energías renovables no convencionales (ver figuras 28 y 29).

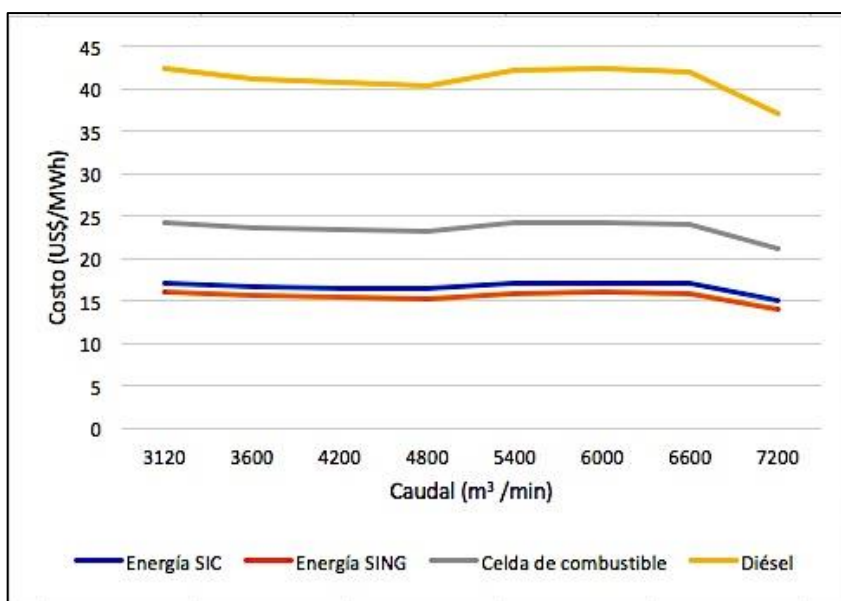


Figura 28. Caudal v/s costo para ventiladores principales bajo el uso de energía diésel, del SIC, SING, y celdas de combustible.

(Fuente: elaboración propia)

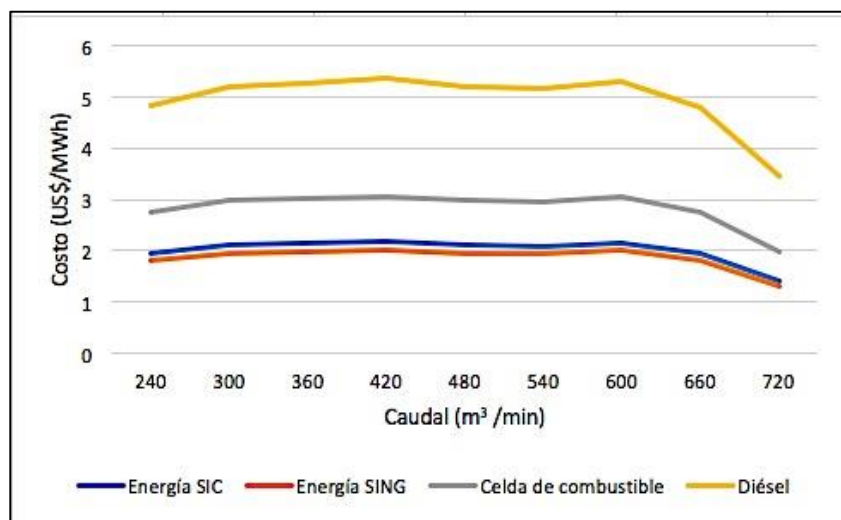


Figura 29. Caudal v/s costo para ventiladores auxiliares bajo el uso de energía diésel, del SIC, SING, y celdas de combustible.
(Fuente: elaboración propia)

Para este caso, se utiliza un costo de 96.9 USD/MWh para la energía proveniente del SIC (Generadoras de Chile, 2017), 90.3 USD/MWh para la energía proveniente del SING (Generadoras de Chile, 2017), 239 USD/MWh para la energía diésel (Lazard, 2017), y 137 USD/MWh para la energía de celdas de combustible (Lazard, 2017). El costo local que representaría utilizar cada tipo energía de acuerdo a la potencia requerida por cada uno de los escenarios simulados se presenta en la tabla N°15.

Tabla 15. Cuadro comparativo costo local asociado al uso de energía SIC, SING, diésel y celdas.

Escenario	Requerimiento energético (KW)	Tipo de energía	Costo (USD/hr)
1	80.8	SIC	7.83
		SING	7.30
		Diésel	19.31
		Celda de combustible	11.07
2	264.4	SIC	25.62
		SING	23.88
		Diésel	63.19
		Celda de combustible	36.22
3	243.4	SIC	23.59
		SING	21.98
		Diésel	58.17
		Celda de combustible	33.35

(Fuente: elaboración propia)

Los datos utilizados para la confección de gráficos se presentan en el anexo N°5.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

VI.1 Mercado actual y el contexto chileno

Analizando los datos obtenidos del estudio de mercado, Chile se encuentra en una posición relativamente neutra respecto a las posibilidades reales de incluir las tecnologías de celdas de combustible en la industria minera. Esto ocurre, debido a que la oferta actual que existe de este tipo de tecnologías y de los recursos necesarios para su implementación, como lo es la producción de hidrógeno, son casi nulos para el contexto nacional, y muy reducidos para el contexto regional (Chile como parte de América Latina), por lo que un futuro desarrollo de estas celdas, al menos al corto plazo, quedaría supeditado a la participación de agentes extranjeros en temas de desarrollo y comercialización.

Si bien gran parte de los procesos que se requiere conocer para comenzar una cultura de hidrógeno en el país ya son conocidos, como lo es el caso de la electrólisis, o el uso de celdas de hidrógeno como equipo complementario a los motores diésel en el caso de la industria automóvil, aún hay una ausencia de incentivos y motivación suficiente para fomentar el desarrollo de estas tecnologías por parte de la industria, centros de investigación, o el mismo gobierno, por lo que todo intento de desarrollar este tipo de tecnología, eventualmente se torna difícil al no contar con la aceptación y la normalización de la misma.

Si se analiza ahora la demanda existente por nuevas fuentes de energía, Chile presenta una necesidad latente y creciente por incluir un mayor desarrollo energético renovable, especialmente en el rubro de la minería, principal actividad económica del país y de uso intensivo de energía en sus procesos. Sin embargo, y pese a la aparente ventaja de entrada que tendría el uso de celdas de combustible, éstas quedan en un segundo plano, pues energías ya más establecidas como la solar o la eólica, y que de paso contrastan un desarrollo eficiente y amigable en comparación a energías más tradicionales como la hidroeléctrica, son la nueva meta a la cual el desarrollo productivo e industrial del país apuntan.

Pese al panorama, en apariencia desalentador, previamente descrito, las celdas de combustible sí tienen mayores posibilidades de entrada en cuanto a minería subterránea se refiere, pues dichas operaciones, a diferencia del contexto nacional general, si centran gran parte de sus recursos en identificar nuevas tecnologías e innovaciones que les permitan seguir operando bajo dos pilares fundamentales que sostienen a la industria minera, la sustentabilidad medioambiental y la eficiencia energética en pos de reducir costos y aumentar la rentabilidad, y las celdas de combustible se presentan como el candidato ideal para este tipo de labores, pues su bajo tamaño, simpleza en operación y reducida emisión de contaminantes, hacen de éstas un aliado que toda operación desearía tener. Si bien se esperaría que el uso de esta tecnología fuera destinado a aquellas operaciones que presentan un mayor gasto energético, es necesario entender que sus características y el poder que éstas pueden alcanzar, limita su participación en procesos de alta demanda energética, por lo que su integración en procesos, que si bien, pueden no

presentar un gasto de energía excesivo, permite contribuir de una manera mucho más real y plausible a la baja generación de contaminantes que tanto se busca.

Analizando más específicamente las posibilidades de integración de este tipo de tecnologías en sistemas de ventilación de minas, el mercado bajo el cual nos encontramos de igual manera presenta una situación ventajosa para el uso de este tipo de energía, pues es en la minería subterránea donde los combustibles fósiles, principal contraparte de las celdas de combustible, adquiere una mayor participación.

El gran desarrollo que el uso de hidrógeno como fuente de energía para la industria automotriz ha tenido en el último tiempo, no solo permite demostrar que esta tecnología es capaz de cubrir la necesidad energética que un vehículo requiere, sino que fomenta el desarrollo y la creación de nuevo conocimiento en materias de energía portátil, eficiente y segura, mismo tipo de energía que sistemas de ventilación en condiciones de extremo cuidado como lo es el trabajo bajo tierra requieren.

Bajo el escenario anterior, y sumado a las pocas, pero significativas iniciativas que ya se están desarrollando en el país y en el rubro minero, como el fomento a la investigación en materia de equipos mineros a base de hidrógeno impulsadas por CORFO, las posibilidades de que esta energía pueda ser homologada para su uso en otros procesos y equipos ya pasan a ser probabilidades, por lo que su uso en sistemas de ventilación es esperable ocurra prontamente.

Considerando, por tanto, todo lo previamente mencionado, el mercado actual del hidrógeno y las celdas de combustible bajo el contexto chileno muestra la existencia de una necesidad importante por comenzar a desarrollar este tipo de tecnologías a nivel regional y local, pues considerando las altas exigencias ambientales que cada vez se agudizan y la constante búsqueda de fuentes alternativas de energía, estas serán vitales para alcanzar el desarrollo de cualquier país en el mediano plazo. Pese a lo anterior, y producto del gran desarrollo mostrado por otras partes del mundo en su uso para la industria automotriz y de equipos industriales, de las constantes iniciativas para encaminar el desarrollo energético en este tipo de energías que Chile ha mostrado en el último tiempo, y de la gran implicancia que la inclusión de nuevas tecnologías eco-amigables y eficientes tiene en el desarrollo de la actividad minera local, el desarrollo de celdas de combustible para operaciones subterráneas se ve cada vez más cerca, incluso aunque en un inicio deba depender de países extranjeros, siendo actividades como la ventilación de minas, uno de los pasos lógicos para desarrollar este tipo de tecnologías en aquellas actividades que aún no muestran señales de integración de estas celdas.

VI.2 Factibilidad técnica de instalación en ambientes mineros

Tomando en cuenta el estudio técnico realizado para el uso de celdas de combustible en operaciones mineras de ventilación, la probabilidad de que estas puedan ser utilizadas en dicho entorno laboral se presenta bastante favorable, pues no dista mucho de las

condiciones de instalación y operación que las fuentes de energía actualmente utilizadas deben cumplir.

Si se analiza las características de localización y las normativas legales que esta tecnología debe cumplir, las celdas de combustible no presentan mayor dificultad en el cumplimiento de estas, incluso siendo un ambiente minero, pues solo requieren respetar condiciones básicas, como cimientos o protección de la estructura principal, que son fácilmente alcanzables. Respecto a las conexiones que deben existir en materia de transporte de combustible y de redes eléctricas, esta tecnología tampoco presenta mayores dificultades, debiendo seguir las mismas indicaciones que las actuales fuentes de poder utilizan para su uso en minería. Si bien podría llegar a existir necesidades extras como un sistema recolector del agua generada como residuo, este tipo de instalación no implica un quiebre respecto a las instalaciones que una operación minera subterránea presenta (se presume ya cuentan, por ejemplo, con sistemas de drenaje ante entrada de agua), por lo que más que una desventaja, podría incluso transformarse en una ventaja si se considera que el agua generada podría ser utilizada en otros procesos donde la presencia de la misma es sumamente necesaria.

Respecto al impacto que la contaminación presente en el ambiente de las operaciones mineras podría causar en el funcionamiento normal de las celdas, éste se reduce en gran medida si estas celdas se destinan para su uso como fuente energética de sistemas de ventilación, ya que si bien, en el caso de su uso en equipos estas podrían perder parte de su potencial o incluso apagarse, las causas de dicho comportamiento, como lo era la falta de oxígeno, la acumulación de polvo y partículas en suspensión, y los cambios de temperatura, tenderían a no ocurrir si el uso se da en ventiladores, pues contarían con flujos de aire con suficiente oxígeno que evitaría además la acumulación de polvo y partículas en su interior y la existencia de cambios bruscos de temperatura. De igual manera, en caso de que las condiciones de la mina pudieran llegar a afectar la celda de alguna manera, su funcionamiento, salvo en casos excepcionales, no se ve alterado de manera grave, y se pueden tomar medidas paliativas para evitar que los factores causantes del mal funcionamiento se presentasen, como contar con una segunda fuente de poder alternativa en caso de mal funcionamiento o invertir en mayor protección y filtros para las zonas donde la celda se espera funcione.

VI.3 Factibilidad técnica de generación de energía suficiente.

Considerando ahora los requerimientos de generación de energía requeridos por los sistemas de ventilación simulados, si bien estos escenarios representan solo una parte del total de labores y zonas que una mina real podría llegar a tener, la simulación realizada permite inferir que un stack de celdas de hidrógeno, con las capacidades previamente mencionadas en secciones anteriores, permitiría sin mayor problema cumplir con la demanda energética generada por el sistema de ventilación, llegando incluso a prescindir de la potencia máxima que un sistema basado en celdas PEMFC podría llegar a generar.

Esto permite aseverar a su vez, que el uso de celdas podría incluso aplicarse a otros procesos dentro de la mina, como lo es la iluminación o la calefacción, permitiendo generar un ahorro energético aún mayor, siempre y cuando se respeten las capacidades máximas que una celda o stack de celdas puede generar.

Pese a lo anterior, es necesario considerar que la factibilidad técnica de generación de energía va a depender del diseño del sistema de ventilación, de los ventiladores utilizados, y de los caudales requeridos por cada mina en su contexto particular, por lo que si bien, dentro de las simulaciones realizadas se permite cumplir satisfactoriamente con la potencia energética requerida, es necesario hacer estudios más profundos y de índole práctica para estimar si el comportamiento alcanzado en el presente trabajo puede replicarse en una situación de ventilación real, considerando especialmente que los escenarios simulados, si bien se basan en métodos de explotación comunes dentro de la industria, solo contemplan una pequeña parte de lo que sería una mina real.

Cabe mencionar sin embargo, la necesidad constante de monitorear el correcto funcionamiento de las celdas, y la variación que los caudales de flujo pueden presentar durante la realización de las distintas actividades de la mina, pues el tipo de celdas, la cantidad de celdas que requiera el stack, y la potencia que finalmente se genere, va a tener dependencia directa en que las condiciones para el correcto funcionamiento de las celdas se cumplen y en los caudales que cada stack de celdas deba alimentar, pues un aumento de estos implica un aumento de demanda energética, y por ende un aumento en la potencia generada por las celdas.

VI.4 Costos de producción generales y locales

Si se analizan ahora los costos de producción asociados que tendría la inclusión de este sistema, se puede observar como estos no representan un gasto tan significativo respecto a las utilidades generadas en el rubro minero, sin considerar los beneficios ambientales asociados que podrían generar.

En el caso de los costos en los que se incurriría al construir una celda de hidrógeno, si bien para el caso de Chile el escenario más probable es pagar el precio de producción para 1000 sistemas de celdas (que no percibe un beneficio producto de las economías de escala que si se generan al aumentar el número de celdas producidas) sería cercano a los 233.5 USD por kilowatt producido, lo que llevaría finalmente, para el caso de los escenarios analizados (minería artesanal, sublevel stoping y bloque de block caving), incurrir en gastos cercanos a los 19,000; 62,000; y 57,000 USD respectivamente. Si, por el contrario, se lograra alcanzar una producción de celdas cercana a las 500,000 unidades, estos valores se reducirían drásticamente, alcanzando un costo por kilowatt cercano a los 52 USD y generando finalmente un gasto para cada escenario de 1,778; 13,749; y 12,657 USD respectivamente.

En relación a los costos que se debería incurrir para la producción de hidrógeno, entre las dos alternativas analizadas, aquella que más conviene es la realizada por electrólisis, ya que los costos incurridos en la generación de 1 kilo hidrógeno suelen ser menores en comparación a los alcanzados por los ciclos termoquímicos. Paralelo a lo anterior, esta alternativa también se presenta como la más adecuada producto de la experiencia y la instrumentaria que se posee para su ejecución, ya que son procesos que, si bien no se aplican directamente para la obtención de hidrógeno como combustible de celdas, ya se han realizado dentro del contexto nacional minero, por lo que la inversión en mano de obra e infraestructura tendería a ser menor respecto a la generación de ciclos termoquímicos. Si bien en la actualidad estos últimos no presentan un alto grado de desarrollo a nivel país, es recomendable estar pendiente de los cambios que dicha tecnología pueda sufrir en el futuro, ya que el potencial de Chile en materias de energía solar y el posible desarrollo de nuevas plantas de energía solar concentrada, podrían contribuir a alcanzar mejores precios en cuanto a producción de hidrógeno se refiere.

Respecto al costo nivelado de energía que se presenta actualmente en el mundo, si bien la energía producida a partir de celdas de hidrógeno no presenta el costo más bajo respecto a la energía eólica o la energía solar, sus características de portabilidad y flexibilidad de operación, podría resultar mucho más atractiva que otras fuentes de energía en operaciones con condiciones de mucha profundidad y/o mucha altura geográfica, obteniendo ventajas y un mejor nivel de competitividad respecto a estas energías.

Si se analiza ahora desde una perspectiva más local, al ser Chile un país que aún no aprovecha totalmente el potencial en energías renovables no convencionales que posee, los costos nivelados que presenta tanto para energía solar como eólica son muy diferentes respecto a los calculados globalmente, generando un aumento de estos que permite ubicar a las celdas de combustible en una mejor posición respecto a costos, alcanzando una diferencia su favor de casi de 70 USD respecto a la energía solar, y una diferencia cercana al dólar respecto a la energía eólica, otorgándole mucha mayor competitividad a este tipo de energía. Cabe mencionar, sin embargo, que el desarrollo que pudiesen alcanzar tanto la energía eólica como solar afectaría directamente los costos que éstas presentarían en un futuro, más aún considerando que su participación actual dentro de la matriz energética nacional es menor al 15% y que las características geográficas de Chile podrían beneficiar aún más la reducción de sus costos, por lo que será necesario seguir estudiando más adelante cómo varían los precios y en cuánto disminuye la diferencia respecto a los costos nivelados globales que presentan las celdas de combustible, las cuales, de igual manera y considerando potenciales sinergias con las energías previamente mencionadas, podrían también ver modificados sus costos a nivel nacional.

Considerando también la comparación de costos existente entre las celdas de hidrógeno y los actuales sistemas de obtención de energía utilizados en minería para la alimentación de sus sistemas de ventilación (diésel y conexiones a los sistemas SIC y SING dependiendo de la ubicación regional de la mina), esta nueva tecnología aún queda en desventaja respecto a los costos que se presentan en los sistemas interconectados (no así

respecto al combustible diésel, donde si presenta una leve ventaja), pero su portabilidad y fácil acceso en comparación a los sistemas actuales aún le permiten ser una opción real para aquellas minas que por falta de medios o de infraestructura no pueden tener un acceso óptimo a estos sistemas.

Finalmente, y tomando en cuenta que el uso de estas celdas implica la generación de agua, recurso escaso y necesario en faenas mineras, ésta podría potencialmente presentar un impacto positivo respecto a los costos que el utilizar celdas de combustible generaría, en la medida que la inversión incurrida para su desarrollo podría a su vez traducirse en una reducción costos asociada al tratamiento de agua o la obtención de la misma, o incluso una mejor imagen corporativa, y por ende la obtención de licencia social para operar por parte de las faenas (en la medida que producirían su propia agua sin afectar las localidades en donde se ubican), reduciendo parte de los costos en los que se debe incurrir para negociar con las comunidades.

Si bien lo anterior, en teoría suena positivo, es necesario realizar estudios más acabados para medir el real impacto que la generación de agua podría presentar en los costos que incurre la empresa minera.

VI.5 Posibilidades de incorporación de energías renovables solar y eólica

Tomando en cuenta el desarrollo de energías renovables solar y eólica que presenta el país, si bien este aún se encuentra en etapa de crecimiento respecto a la capacidad generada, el potencial de desarrollo que exhibe para ambas energías es bastante alentador, sobre todo considerando que los planes gubernamentales para el desarrollo de este tipo de energía se encaminan hacia un aumento constante del uso de estas energías, por lo que disponibilidad de fuentes energéticas limpias que pudieran servir a la producción de hidrógeno sin contaminación existe y aumentará con el tiempo.

Respecto a sinergias directas que pudiesen generarse entre estas tecnologías y el uso de celdas de combustible en minería, el panorama actual es bastante incierto, pues si bien presenta ventajas respecto a su desarrollo en materia de uso eficiente de la energía generada por el aire o el sol, también presenta limitaciones respecto a las locaciones que dichas tecnologías deben cumplir, ya que estas deben encontrarse cercanas a los yacimientos mineros en los que se espera utilizar esta energía para evitar grandes costos y tiempos de traslado.

Desde el punto de vista del uso eficiente de energía, y entendiendo que la energía generada por paneles solares (tanto fotovoltaicos como de energía solar concentrada) y aerogeneradores no siempre se utiliza completamente, el desarrollo conjunto de las celdas con estas energías se presenta como una potencial solución a la sobregeneración de energía que puede presentarse. En el caso de la energía solar, el calor generado por la exposición de los paneles al sol puede ser utilizado para reducir la cantidad de energía que se requiere para alcanzar las temperaturas en las que la hidrólisis se produce, permitiendo

así un uso paralelo en beneficio de la tecnología de celdas sin sacrificar eficiencia en el proceso normal de producción de energía solar. En el caso de la energía eólica, al ocurrir en ocasiones que la generación de energía producida es mayor a la demandada, esta, en vez de disiparla para evitar el colapso de los sistemas eléctricos, puede ser utilizada para alimentar procesos de producción de hidrógeno, nuevamente actuando de manera complementaria sin afectar la generación energética primaria.

Desde el punto de vista de las locaciones requeridas, si bien Chile cuenta con ventajas territoriales bastante destacables que permitirían pronosticar un gran desarrollo de este tipo de energías, la asociación de zonas adecuadas para su instalación (que cuenten con velocidades de vientos aceptables para la producción energética, o que en su defecto, generen la radiación suficiente en el caso del uso de energía solar) con zonas de yacimientos mineros no necesariamente ocurrirá, considerando aún más que los casos donde las celdas de hidrógeno serían más útiles por su flexibilidad y portabilidad, son aquellas minas de acceso limitado y con condiciones de entorno difíciles, por lo que es necesario realizar un estudio más profundo respecto a la existencia real de compatibilidad de zonas mineras y zonas con potencial uso de energías alternativas.

Pese a lo anterior, y considerando que actualmente existen proyectos tanto eólicos como solares asociados directamente a faenas mineras como es el caso de Los Pelambres o la división Gabriela Mistral, las posibilidades de sinergias con uso aplicado a la minería deberían tender a crecer, especialmente si se considera que actividades como la ventilación subterránea no son tan intensivas en uso de energía, pues esto produce que las cantidades de celdas requeridas y de hidrógeno producido sean menores, causando finalmente que la energía consumida que se requiera de las fuentes energéticas alternativas sea menor, y por ende, que sea más fácil de producir.

VII. CONCLUSIONES GENERALES

A modo general, y tomando en cuenta los diferentes análisis realizados respecto al potencial uso que podría tener las celdas de combustible en sistemas de ventilación de minas, es necesario destacar que si bien la oferta actual del país no se condiciona con la demanda latente existente, y por tanto dificulta la generación de un mercado local en torno a esta fuente energética, las posibilidades reales de desarrollar este tipo de tecnologías aumenta cuando se trata de su uso en labores mineras, pues la búsqueda constante de eficiencia energética y reducción del impacto ambiental son pilares extremadamente importantes dentro del desarrollo sustentable de la minería en Chile.

Si bien la presencia de insumos como el hidrógeno o el desarrollo de tecnologías dedicadas a su producción aún no alcanza todo su potencial, la factibilidad de instalación, el cumplimiento legal, y la operatividad que presentan las celdas en condiciones mineras invitan a que dichas fallencias comiencen a ser reparadas, pues el impacto positivo que la inclusión de esta tecnología podría traer a la minería es mucho mayor que la falta de condiciones ideales que aún existen en el país.

Tras haber corroborado que la generación de energía que estas celdas pueden brindar permite subsanar las necesidades energéticas de los sistemas de ventilación, solo es necesario comenzar a generar las oportunidades de desarrollo de esta tecnología, ya que, si bien los costos que presenta su uso son competitivos respecto a otras fuentes de energías renovables, esto podrían reducirse aún más si se acompaña por una producción masiva.

Finalmente, y considerando lo anteriormente expuesto, es que, si bien en un corto plazo se vislumbra difícil la incorporación de esta tecnología en sistemas de ventilación, el uso de estas celdas, en una primera instancia y contemplando plazos mayores de tiempo para que alcance un desarrollo pleno, podría tener cabida dentro de la industria minera nacional.

VIII. RECOMENDACIONES

En base a los resultados de pre-factibilidad obtenidos, se recomienda continuar con la investigación respecto al desarrollo del uso de celdas de combustible a base de hidrógeno en sistemas de ventilación para minería subterránea, con el fin de lograr determinar claramente si las características de Chile permiten un desarrollo real de este mercado, y corroborando, a través del desarrollo de prototipos experimentales y posteriores pruebas pilotos, que su uso en ambientes mineros para sistemas de ventilación es óptimo y permite contribuir de manera significativa a la disminución de desechos contaminantes, pudiendo así cuantificar el impacto real que la incorporación de esta tecnología tendría en materia de costos para la operación de la mina.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cochilco. (2016). *Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2016-2027*. Cochilco, Santiago.
- Seia.org. (s.f.). *Initiatives: about solar energy*. Recuperado el 2017, de sitio web de la asociación de industrias de energía solar (Solar Energy Industries Association): <https://www.seia.org/initiatives/about-solar-energy>
- Seia.org. (s.f.). *Initiatives: photovoltaic solar energy*. Recuperado el 2017, de sitio web de la asociación de industrias de energía solar (Solar Energy Industries Association): <https://www.seia.org/initiatives/photovoltaic-solar-electric>
- Ecoefecto. (s.f.). *tecnología FV*. Recuperado el 2017, de sitio web de Ecoefecto: http://www.ecoefecto.com/tecnologia_fv.htm
- International Energy Agency. (2010). *Technology Roadmap Concentrating Solar Power*. OECD, International Energy Agency, París.
- Energías renovables. (s.f.). *solar: tipos de energía solar*. Recuperado el Julio de 2017, de sitio web de energías renovables: <http://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/tipos-energia-solar/>
- Planetsave. (8 de febrero de 2016). *Understanding Concentrated Solar Power Technology*. Recuperado el Julio de 2017, de sitio web de Planetsave: <https://planetsave.com/2016/02/08/understanding-concentrated-solar-power-technology/>
- Suárez, E. F. (2016). *Estado Actual del Hidrógeno Aplicado a Celdas de Combustible*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México.
- Gupta, R. B. (2009). *Hydrogen fuel: Production, transport, and storage*. Boca Raton, Florida, Estados Unidos: CRC Press.
- Fuel Cell and Hydrogen Energy Association. (2017). *Fuel Cell Technologies Market Report*. Reporte de mercado, U.S. department of energy, Office of energy efficiency and renewable energy, Washington, D.C.
- C. H. Aporta, P. E. (junio de 2011). Estudio de los ciclos termoquímicos para la producción de hidrógeno nuclear. *Revista de la CNEA*.
- G.E. Besenbruch, L. B. (2000). *High efficiency generation of hydrogen fuels using nuclear power*. Reporte, University of Kentucky, París.
- Martín, E. T. (2012). *Estudio de alternativas para la producción de hidrógeno con ciclos termoquímicos y energía solar térmica de alta temperatura*. . Proyecto fin de Máster, Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Sevilla.
- SERNAGEOMIN. (2008). *Guía metodológica de seguridad para proyectos de ventilación de minas*. Guía metodológica, Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de seguridad minera, Santiago.
- E4Tech. (2016). *The fuel cell industry review 2016*. Review, E4Tech.
- Hydrogen tools. (Enero de 2016). *Hydrogen tools*. Recuperado el Noviembre de 2017, de h2tools: <https://www.h2tools.org/hyarc/data/hydrogen-production>

- Cochilco. (2017). *Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2016*. Cochilco, Santiago.
- Cochilco. (2016). *Proyección de la producción de cobre en Chile 2016 – 2027*. Cochilco, Santiago.
- Ministerio de energía de Chile. (2015). *Energía 2050: política energética de Chile*. Política pública, Ministerio de energía de Chile, Santiago.
- CORFO. (s.f.). *convocatorias: corfo*. Recuperado el Noviembre de 2017, de Sitio web de la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO):
https://www.corfo.cl/sites/cpp/convocatorias/2017desarrollo_de_sistema_de_combustion_dual_hidrogeno-diesel
- Ellaima . (s.f.). *Pampa Elvira*. Recuperado el Octubre de 2017, de sitio web de Ellaima energía: <https://ellaimasolar.cl/espanol#pampaelvira>
- Antofagasta minerals. (2015). *Noticias: Parque eólico El Arrayán: energía más limpia para Los Pelambres*. Recuperado el Octubre de 2017, de sitio web de Antofagasta Minerals:
<http://www.aminerals.cl/comunicaciones/noticias/2015/parque-eolico-el-arrayan-energia-mas-limpia-para-los-pelambres/>
- Programa energía solar. (2017). *Programa energía solar*. Recuperado el Septiembre de 2017, de sitio web de Programa energía solar:
<http://www.programaenergiasolar.cl/expertos-aseguran-que-hidrogeno-solar-puede-gatillar-la-transformacion-productiva-de-chile/>
- Ministerio de relaciones exteriores. (2017). *OCDE: recomendaciones*. Recuperado el Octubre de 2017, de Sitio web del ministerio de relaciones exteriores:
<http://chile.gob.cl/ocde/recomendaciones/innovacion-investigacion-y-desarrollo-ciencias-y-tecnologia>
- U.S. department of energy. (2004). *Module 1: Permitting stationary fuel cell installations*. U.S. department of energy, Energy Efficiency and Renewable Energy office.
- ASIMET. (s.f.). *PDF: neo 05*. Recuperado el Septiembre de 2017, de sitio web de ASIMET: <http://www.asimet.cl/pdf/neo05.pdf>
- Ministerio de minería. (2002). *Ministerio de minería*. Recuperado el Agosto de 2017, de minmineria: <http://www.minmineria.gob.cl/decretos-y-reglamentos-ministeriales/decreto-n%C2%B0132/>
- ASME. (s.f.). *Productos: código b313 tuberías procesos refinerías planta*. Recuperado el Octubre de 2017, de sitio web de ASME:
<https://www.asme.org/products/courses/codigo-b313-tuberias-proceso-refinerias-plantas>
- NFPA. (2017). *codes and standards*. Recuperado el Octubre de 2017, de sitio web de NFPA: <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/>
- Hydrogen tools. (s.f.). *Fuel cell standards*. Recuperado el Octubre de 2017, de sitio web de Hydrogen tools: <https://www.h2tools.org/fuel-cell-standards/ansicsa-america-fc3-2004-american-national-standard-portable-fuel-cell-power>

- Air liquide. (s.f.). *gas hidrógeno*. Recuperado el Octubre de 2017, de sitio web de Air liquide Chile: <https://industrial.airliquide.cl/gas-hidrogeno>
- Proingas. (s.f.). *productos*. Recuperado el octubre de 2017, de sitio web de Proingas: <http://www.proingas.cl/productos.html>
- Praxair. (s.f.). *gases: hydrogen*. Recuperado el octubre de 2017, de sitio web de Praxair: <http://www.praxair.cl/gases/hydrogen>
- Ministerio de energía de Chile. (2014). *Energías renovables en Chile: el potencial eólico, solar e hidroeléctrico de Árica a Chiloé*. Estudio, Ministerio de energía de Chile, Santiago.
- Comisión chilena de energía nuclear. (s.f.). *Productos y servicios: Nuestra infraestructura*. Recuperado el Agosto de 2017, de sitio web de la comisión chilena de energía nuclear: http://www.cchen.cl/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=50&Itemid=153
- Solarreserve. (s.f.). Obtenido de sitio web de Solarreserve: <http://www.solarreserve.com/es>
- Productos químicos Chile. (s.f.). *Productos*. Recuperado el Septiembre de 2017, de sitio web de Productos químicos Chile: <http://productosquimicoschile.cl/productos/>
- Química industrial. (s.f.). *Productos*. Recuperado el Septiembre de 2017, de sitio web de Química industrial: <http://quimicaindustrial.cl/productos.php>
- Quimetal. (s.f.). *Productos*. Recuperado el septiembre de 2017, de sitio web de Quimetal: <http://www.quimetal.cl/interior.php>
- HHO. (s.f.). *Productos*. Recuperado el septiembre de 2017, de sitio web de HHO Chile: <http://www.hho.cl/cms/?Productos>
- Hidrógeno automotriz. (s.f.). Recuperado el septiembre de 2017, de sitio web de hidrógeno automotriz: <https://hidrogenoautomotriz.cl/>
- Marc C. Bétournay, G. B. (mayo de 2004). The effects of mine conditions on the performance of a PEM fuel cell. *Journal of power sources*.
- Strategic analysis inc. (2017). *Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2016 Update*. Reporte, U.S. Department of energy.
- Siemens. (Mayo de 2017). The renewable hydrogen, new opportunities for Chile: Applications in Mining, Transport and Energy. Santiago.
- J. Plou, P. D. (diciembre de 2014). Perspectiva sobre la producción de hidrógeno por métodos emergentes basados en energía solar y de alta temperatura. *Boletín Grupo Español Carbón*.
- Natural Resources Defense Council. (2013). *Beneficios Económicos de Energías Renovables No Convencionales en Chile*. Reporte, Asociación Chilena de Energías Renovables.
- Lazard. (2017). *Perspective: Levelized cost of energy 2017*. Recuperado el noviembre de 2017, de sitio web de Lazard: <https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-2017/>
- Saavedra, R. (2015). *Estimación del impacto ambiental y económico de la incorporación de la energía eólica y solar a la matriz energética chilena bajo*

- distintos escenarios futuros*. Tesis, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago.
- Generadoras de Chile. (2017). *Boletín del mercado eléctrico, sector generación*. Boletín, Generadoras de Chile, Santiago.
- Energía solar al día. (2017). *Energía solar al día*. Recuperado el Noviembre de 2017, de sitio web de Energía solar al día: <https://energiasolaraldia.com/en-chile-empezaran-a-fabricar-paneles-solares-que-se-comercializarian-tambien-en-argentina/>
- Programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética en Chile. (s.f.). *4e Chile*. Obtenido de sitio web de Programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética en Chile: <https://www.4echile.cl/primer-seminario-de-energia-eolica-en-la-region-del-maule/>
- Generadoras de Chile. (2017). *Tipos de energía: energía eólica*. Recuperado el Octubre de 2017, de sitio web de Generadoras de Chile: <http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-eolica>
- Mainstream Renewable Power Chile. (2017). *tecnología: energía eólica*. Recuperado el octubre de 2017, de sitio web de Mainstream Renewable Power Chile: <http://mainstreamrp.cl/tecnologia/energia-eolica/>
- IRENA. (2017). *Estadísticas de capacidad renovable 2017*. Reporte, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Fuel Cell Technologies Office. (2015). Fuel cells fact sheet. Estados Unidos.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2015). *Catalog of CHP technologies: Section 6. Technology characterization - Fuel cells*. U.S. Environmental Protection Agency.
- CORFO. (s.f.). *Aplicación del Hidrógeno al Sector Transporte: Reporte de Inteligencia Tecnológica*. CORFO, Dirección de desarrollo tecnológico.

X. ANEXOS

Anexo N°1: Fórmulas utilizadas para el cálculo de caudales de aire requeridos.

- Caudal requerido por el número de personas en la mina:

$$QP = F \times N \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

QP = Caudal total para “N” personas trabajando al interior de la mina.

F = Caudal mínimo requerido por persona (m³/min)*.

N = Número de personas en el lugar.

* En el contexto del presente trabajo, el valor utilizado de “F” corresponde al exigido en el artículo 138 del Reglamento de Seguridad Minera (DS 132), correspondiente a 3 m³/min por persona.

- Caudal requerido por equipo diésel:

$$QD = M \times P \times N \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

QD = Caudal de aire requerido por equipo diésel.

M = Caudal mínimo requerido por HP de potencia bruta*.

P = Potencia bruta del equipo (HP).

N = Número de equipos que trabajan en el momento de máxima producción.

*En el contexto del presente trabajo, el valor utilizado de “M” corresponde al exigido en el artículo 132 del Reglamento de Seguridad Minera (DS 132), correspondiente a 2.83 m³/min por caballo de fuerza.

- Caudal requerido por consumo de explosivos:

$$QE = 16.67^* \times A$$

Donde:

QE = Caudal de aire requerido por consumo de explosivo detonado

A = Cantidad de explosivo detonado equivalente a dinamita 60% (Kg)

*Valor correspondiente a la multiplicación del volumen de gases generados por Kg de explosivo utilizado como norma general (0.04 m³/Kg) por 100, y dividido por el % de dilución de los gases en la atmósfera (0.008%) multiplicado por el tiempo de dilución de gases promedio (30 minutos) (SERNAGEOMIN, 2008).

- Caudal total estimado:

$$QT = (QP + QD + QE) \times 1.3$$

Donde:

QT = Caudal total estimado

QP = Caudal total para “N” personas trabajando al interior de la mina.

QD = Caudal de aire requerido por equipo diésel.

QE = Caudal de aire requerido por consumo de explosivo detonado.

*Factor que permite añadir un 30% extra de aire ante eventuales pérdidas y filtraciones que pudieran ocurrir (SERNAGEOMIN, 2008).

Anexo N°2: Distribución espacial de escenarios simulados en Ventsim ®

Escenario N°1

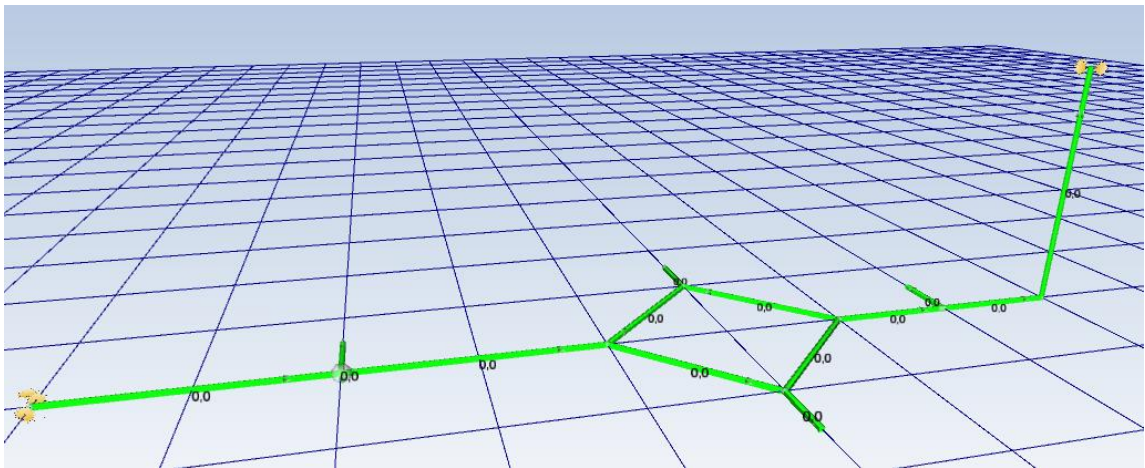


Figura 30. Vista general escenario N°1.
(Fuente: elaboración propia)

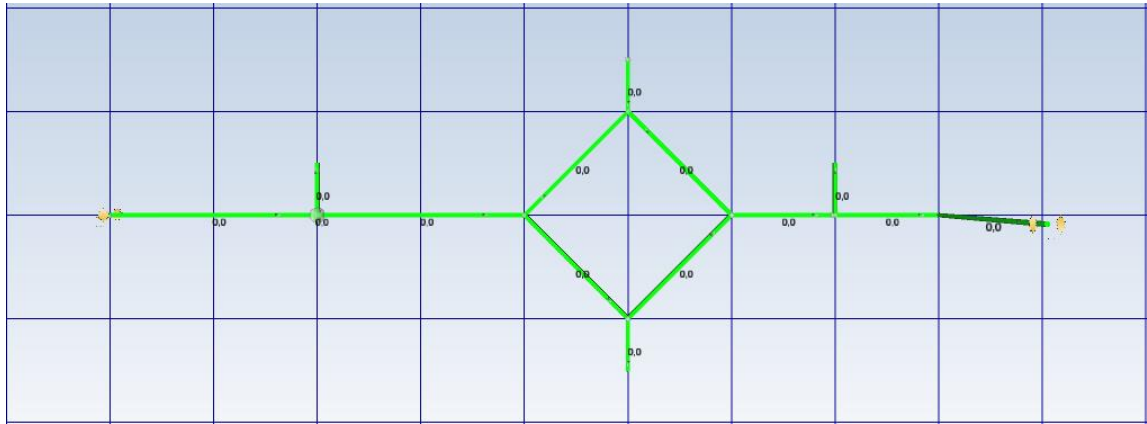


Figura 31. Vista en planta escenario N°1.
(Fuente: elaboración propia)

Escenario N°2

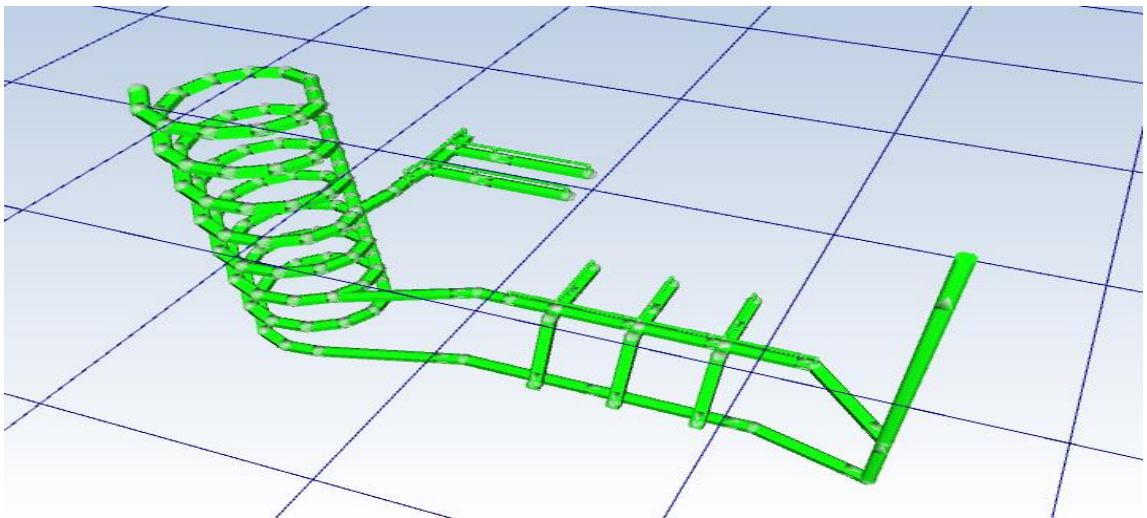


Figura 32. Vista general escenario N°2.
(Fuente: elaboración propia)

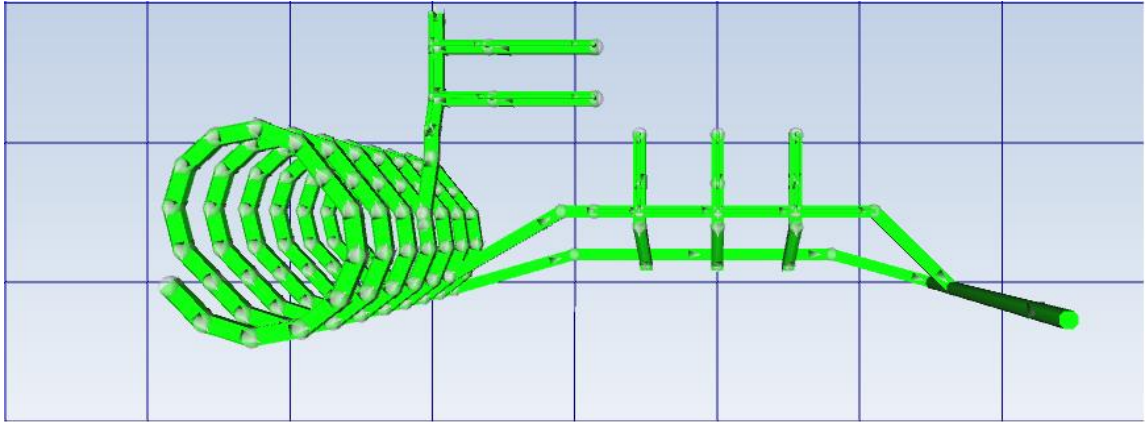


Figura 33. Vista en planta escenario N°2.
(Fuente: elaboración propia)

Escenario N°3

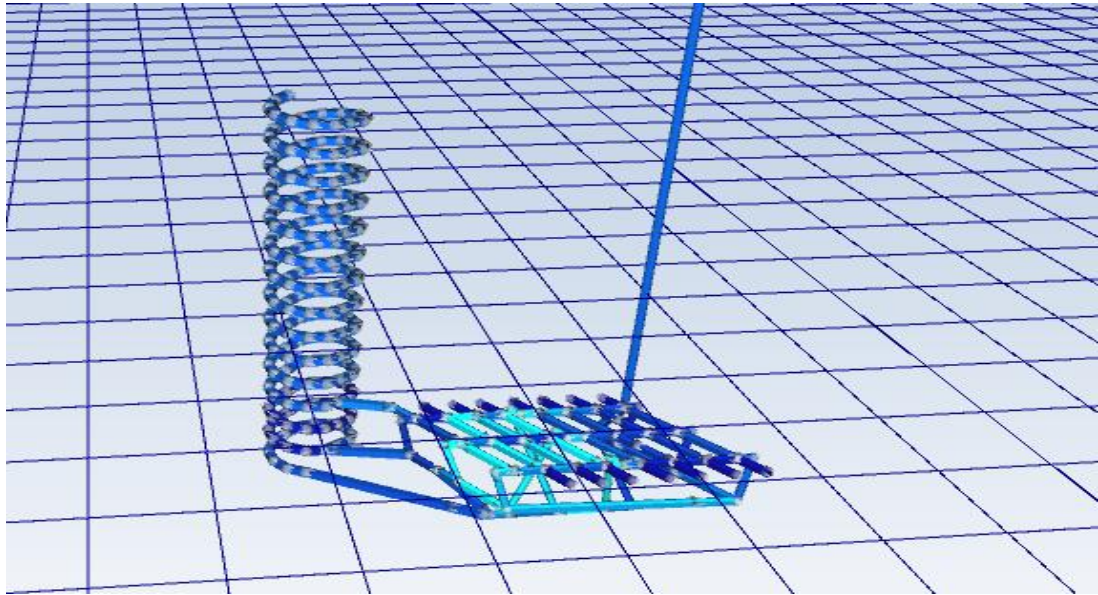


Figura 34. Vista general escenario N°3.
(Fuente: elaboración propia)

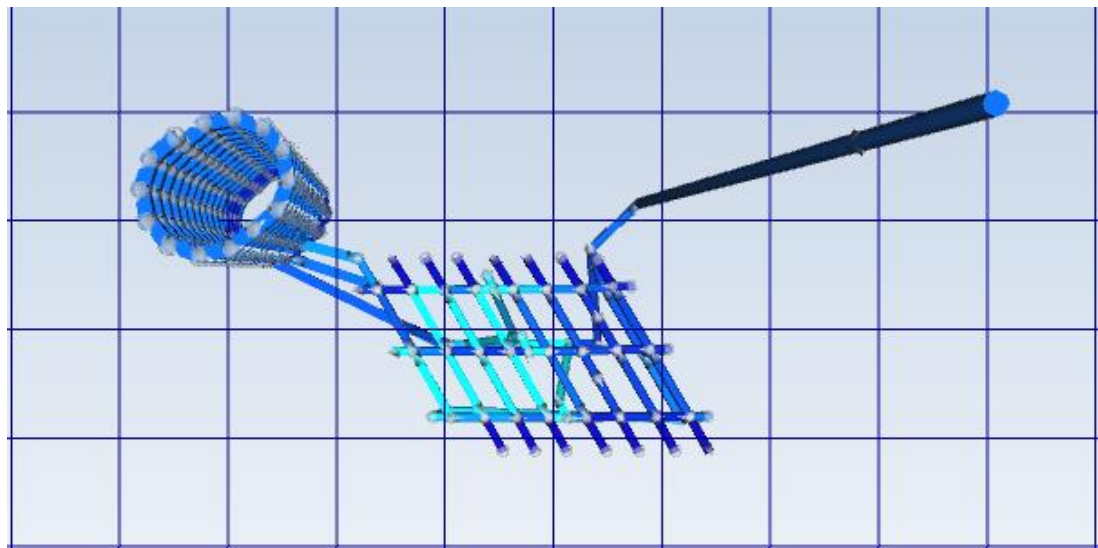


Figura 35. Vista en planta escenario N°3.
(Fuente: elaboración propia)

Anexo N°3: Tablas de datos caudales y potencia absorbida

Ventilador principal:

Tabla 16. Características generales ventilador principal.

Caudal (m3/min)	Presión estática (Pa)	Presión total (Pa)	Eficiencia total (%)	Potencia absorbida (KW)
3120	2000	2042	60	177
3600	1900	1956	68	172.6
4200	1750	1826	75	170.4
4800	1550	1650	78	169.2
5400	1325	1451	74	176.5
6000	1100	1256	71	176.9
6600	850	1039	65	175.8
7200	550	775	60	155

Tabla construida a partir de los datos entregados por el software Ventsim ®

Ventilador auxiliar:

Tabla 17. Características generales ventilador auxiliar.

Caudal (m3/min)	Presión estática (Pa)	Presión total (Pa)	Eficiencia total (%)	Potencia absorbida (KW)
240	2500	2525	50	20.2
300	2350	2389	55	21.7
360	2150	2206	60	22.1
420	2000	2076	65	22.4
480	1800	1899	70	21.7
540	1600	1726	72	21.6
600	1400	1555	70	22.2
660	1000	1188	65	20.1
720	500	723	60	14.5

Tabla construida a partir de los datos entregados por el software Ventsim ®

Anexo N°4: Tablas de datos potencia absorbida y costos asociados a ERNC

Ventilador principal:

Tabla 18. Potencia absorbida y costo energético asociado ventilador principal ERNC.

Potencia absorbida (KW)	Costo energía solar (USD)	Costo energía eólica (USD)	Costo celda combustible (USD)
155	32.7	21.5	21.2
169.2	35.7	23.5	23.2
170.4	35.9	23.6	23.3
172.6	36.4	23.9	23.6
175.8	37.1	24.4	24.1
176.5	37.2	24.5	24.2
176.9	37.3	24.5	24.2
177	37.3	24.5	24.2

(Fuente: elaboración propia)

Ventilador auxiliar:

Tabla 19. Potencia absorbida y costo energético asociado ventilador auxiliar ERNC

Potencia absorbida (KW)	Costo energía solar (USD)	Costo energía eólica (USD)	Costo celda combustible (USD)
14.5	3.1	2.0	2.0
20.1	4.2	2.8	2.8
20.2	4.3	2.8	2.8
21.6	4.6	3.0	3.0
21.7	4.6	3.0	3.0
21.7	4.6	3.0	3.0
22.1	4.7	3.1	3.0
22.2	4.7	3.1	3.0
22.4	4.7	3.1	3.1

(Fuente: elaboración propia)

Anexo N°5: Tablas de datos potencia absorbida y costos asociados a energía diésel, del SIC y del SING.

Ventilador principal:

Tabla 20. Potencia absorbida y costo energético asociado ventilador principal diésel, SIC, SING.

Potencia absorbida (KW)	Costo energía diésel (USD)	Costo energía SIC (USD)	Costo energía SING (USD)	Costo celda combustible (USD)
155	37.0	15.0	14.0	21.2
169.2	40.4	16.4	15.3	23.2
170.4	40.7	16.5	15.4	23.3
172.6	41.3	16.7	15.6	23.6
175.8	42.0	17.0	15.9	24.1
176.5	42.2	17.1	15.9	24.2
176.9	42.3	17.1	16.0	24.2
177	42.3	17.2	16.0	24.2

(Fuente: elaboración propia)

Ventilador auxiliar:

Tabla 21. Potencia absorbida y costo energético asociado ventilador auxiliar diésel, SIC, SING.

Potencia absorbida (KW)	Costo energía diésel (USD)	Costo energía SIC (USD)	Costo energía SING (USD)	Costo celda combustible (USD)
14.5	3.5	1.4	1.3	2.0
20.1	4.8	1.9	1.8	2.8
20.2	4.8	2.0	1.8	2.8
21.6	5.2	2.1	2.0	3.0
21.7	5.2	2.1	2.0	3.0
21.7	5.2	2.1	2.0	3.0
22.1	5.3	2.1	2.0	3.0
22.2	5.3	2.2	2.0	3.0
22.4	5.4	2.2	2.0	3.1

(Fuente: elaboración propia)